




Escola Universitària d'Enginyeria
Tècnica Industrial de Barcelona
Consorci Escola Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Memoria



“Caracterización de scaffolds construidos con 3D printing mediante simulación computacional”

TFG presentado para optar al título de GRADO en
INGENIERÍA MECÁNICA
por **Victor Aguilar Gual**

Barcelona, 9 de Junio de 2015

Director: Ricardo Javier Principe Rubio
Departamento de Mecánica de Fluidos(MF)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

ÍNDICE MEMORIA

Índice Memoria.....	1
Índice Figuras	3
Índice Tablas.....	6
Resumen	7
Resum.....	7
Abstract	8
Agradecimientos	9
Objetivos.....	10
CAPÍTULO 1: Introducción	11
1.1. Scaffolds en 3D printing.....	11
1.1. Mecánica de Fluidos	13
1.2.1. Tipos de los fluidos	13
1.2.2. Equaciones de Navier-Stokes	15
1.2.3. Ley de Poiseuille	16
1.2. Diseño del Scaffold	17
1.3. Dinámica de fluidos computacional.....	18
1.3.1. Objetivo del CFD	18
1.3.2. Etapas del CFD	19
1.3.3. Métodos de discretización.....	19
1.3.4. GID	20
1.3.5. FEMPAR	21
1.3.6. PARAVIEW.....	21
1.3.7. COMSOL	22
CAPÍTULO 2: ANÁLISIS COMPUTACIONAL CON COMSOL	23
2.1. Consideraciones	23
2.2. Pasos y proceso a seguir.....	24
2.3. Análisis de resultados	26
CAPÍTULO 3: ANÁLISIS COMPUTACIONAL CON FEMPAR.....	31
3.1. Consideraciones.....	31
3.2. Partes y procesos a seguir	32
3.2.1 Funciones de GID en el CFD	32
3.2.2 Estudio con FEMPAR	34
3.3. Análisis de los resultados	38
3.4. Influencia de la malla	44

CAPÍTULO 4: EFECTO de rugosidades en el scaffold.....	47
4.1. Influencia de las rugosidades y del mallado.....	48
4.2. Comparación de casos con rugosidades entre COMSOL y FEMPA...52	
4.2.1. Estudio del caso de los dos hilos.....	52
4.2.2. Estudio de un caso con una lámina completamente rugosa. .60	
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES	65
5.1. Valoración de los resultados y los objetivos.....	65
5.2. Problemas y limitaciones.....	66
5.3. Líneas futuras.....	66
CAPÍTULO 6: PRESUPUESTO	67
CAPÍTULO7: BIBLIOGRAFÍA.....	69
7.1. Referencias bibliográficas.....	69
7.2. Bibliografía de consulta.....	70

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1. Representación de los tipos de flujos según su régimen.....	14
Figura 2. Dibujo tipo de un dominio para análisis en CDF.....	19
Figura 3. Representación de los distintos tipos de mallas.....	20
Figura 4. Representación de las velocidades en el plano $Z=0$ y de las líneas de flujo calculadas con COMSOL.....	26
Figura 5. Representación tridimensional de las presiones en todo el dominio calculadas con COMSOL.....	27
Figura 6. Representación tridimensional de las tensiones totales que sufre el scaffold en la dirección X, calculadas con COMSOL.....	28
Figura 7. Representación tridimensional de las tensiones totales que sufre el scaffold en la dirección Y, calculadas con COMSOL.....	28
Figura 8. Representación tridimensional de las tensiones totales que sufre el scaffold en la dirección Z, calculadas con COMSOL.....	29
Figura 9. Captura de pantalla de la ventana Problem Data de GID.....	32
Figura 10. Captura de pantalla en GID donde se muestran las condiciones de contorno aplicadas sobre las caras del dominio.....	33
Figura 11. Captura de pantalla en GID donde se muestran las condiciones de contorno aplicadas sobre las superficies del dominio.....	34
Figura 12. Representación del dominio dividido en 4 partes.....	35
Figura 13. Representación del dominio dividido en 8 partes.....	35
Figura 14. Representación del dominio dividido en 16 partes.....	36
Figura 15. Representación de las velocidades en el plano $Z=0$ calculadas con FEMPAR.....	38
Figura 16. Representación de las líneas de flujo en el plano ZY.....	39
Figura 17. Representación de las líneas de flujo en el plano XZ.....	39
Figura 18. Representación tridimensional de las presiones en todo el dominio calculadas con FEMPAR.....	39

Figura 19. Representación tridimensional de las tensiones totales a lo largo del dominio en la dirección X, calculadas con FEMPAR.....	40
Figura 20. Representación tridimensional de las tensiones totales a lo largo del dominio en la dirección Y, calculadas con FEMPAR.....	41
Figura 21. Representación tridimensional de las tensiones totales a lo largo del dominio en la dirección Z, calculadas con FEMPAR.....	41
Figura 22. Representación en el plano XY de las tensiones totales a lo largo del dominio en la dirección Z, calculadas con FEMPAR.....	42
Figura 23. Representación en el plano XY de las tensiones totales a lo largo del dominio en la dirección Z, calculadas con FEMPAR.....	43
Figura 24. Representación de las velocidades en el plano Z=0 calculadas con FEMPAR para una malla de 269726malla de 269726.....	44
Figura 25. Representación de las velocidades en el plano Z=0 para una malla con 185744 elementos.....	44
Figura 26. Representación tridimensional de la presión en todo el dominio con una malla de 269726 elementos.....	44
Figura 27. Representación tridimensional de la presión en todo el dominio con una malla de 185744 elementos.....	44
Figura 28. Representación tridimensional de las tensiones totales a lo largo del dominio en la dirección Z para una malla de 269726 elementos.....	45
Figura 29. Representación tridimensional de las tensiones totales a lo largo del dominio en la dirección Z para una malla de 185744 elementos.....	45
Figura 30. Imagen real de scaffolds de forma circular y cuadrática.....	47
Figura 31. Fuerzas viscosas que sufren las superficies de los hilos lisos en función del tipo de malla.....	49
Figura 32. Fuerzas viscosas que sufren las superficies de los hilos rugosos en función del tipo de malla.....	50
Figura 33. Fuerzas viscosas que sufren las superficies en el hilo liso y rugoso de tipo 1 en función del tipo de malla.....	51
Figura 34. Representación tridimensional de los esfuerzos viscosos en la dirección del fluido en el hilo fino y rugoso de tipo 1, calculados con COMSOL.....	53
Figura 35. Representación tridimensional de los esfuerzos viscosos en la dirección del fluido en el hilo fino y rugoso de tipo 1, calculados con FEMPAR.....	53

Figura 36. Representación vectorial de los esfuerzos viscosos en la dirección del fluido en el hilo fino y rugoso de tipo 1, calculados con FEMPAR.....	54
Figura 37. Representación tridimensional de los esfuerzos viscosos en la dirección del fluido en el hilo fino y rugoso de tipo 2, calculados con COMSOL.....	55
Figura 38. Representación tridimensional de los esfuerzos viscosos en la dirección del fluido en el hilo fino y rugoso de tipo 2, calculados con FEMPAR.....	55
Figura 39. Representación vectorial de los esfuerzos viscosos en la dirección del fluido en el hilo fino y rugoso de tipo 2, calculados con FEMPAR.....	56
Figura 40. Representación tridimensional de los esfuerzos viscosos en la dirección del fluido en el hilo fino y rugoso de tipo 3, calculados con COMSOL.....	56
Figura 41. Representación tridimensional de los esfuerzos viscosos en la dirección del fluido en el hilo fino y rugoso de tipo 3, calculados con FEMPAR.....	57
Figura 42. Representación vectorial de los esfuerzos viscosos en la dirección del fluido en el hilo fino y rugoso de tipo 3, calculados con FEMPAR.....	57
Figura 43. Representación tridimensional de los esfuerzos viscosos en la dirección del fluido en el hilo fino y rugoso de tipo 4, calculados con COMSOL.....	58
Figura 44. Representación tridimensional de los esfuerzos viscosos en la dirección del fluido en el hilo fino y rugoso de tipo 4, calculados con FEMPAR.....	58
Figura 45. Representación vectorial de los esfuerzos viscosos en la dirección del fluido en el hilo fino y rugoso de tipo 4, calculados con FEMPAR.....	59
Figura 46. Representación en el plano XY de las tensiones totales en la capa rugosa, calculadas con COMSOL.....	60
Figura 47. Representación tridimensional de las tensiones totales en la capa rugosa, calculadas con FEMPAR.....	61
Figura 48. Representación tridimensional ampliada de las tensiones totales donde se aprecian los valores máximos.....	61
Figura 49. Representación del mallado en las zonas de mayor tensión.....	62

Figura 50. Medición de la Longitud de la onda.....	62
---	----

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1. Tiempo de cálculo para cada número de divisiones del dominio..	35
--	----

Tabla 2. Características de los diferentes tipos de malla utilizados con COMSOL.....	48
---	----

Tabla 3. Número de elementos obtenidos para cada tipo de malla en cada una de las cuatro geometrías.....	49
---	----

Tabla 4. Comparativa del número de elementos obtenidos con COMSOL y FEMPAR para cada tipo de malla en cada una de las cuatro geometría.....	52
--	----

Tabla 5. Comparativa del número de elementos obtenidos con COMSOL y FEMPAR para el caso de la capa con rugosidad.....	60
--	----

RESUMEN

En el presente proyecto se ha realizado un estudio de CFD en scaffolds diseñados en impresoras 3D y que son usados en biorreactores de perfusi3n. Para realizar este estudio se han empleado dos tipos de programas de cálculo computacional, COMSOL y FEMPAR, un c3digo libre ejecutable en el entorno Linux, sin interface gráfica, que permite realizar simulaciones en paralelo mediante la tcnica de descomposici3n de dominios.

En este trabajo se pretende demostrar la validez de los resultados obtenidos en la simulaci3n de scaffolds comparando los obtenidos con ambos programas, verificando así la independencia de estos respecto del programa utilizado. Para ello, se han estudiado distintas geometrías. Algunas de estas geometrías presentan una serie de imperfecciones con las que se pretende simular los defectos que pueden causar los procesos de fabricaci3n con los que se construyen los scaffolds. Con esto se quiere demostrar que los esfuerzos que sufra el scaffold serán de mayor magnitud en esas zonas. Detalle que debe ser importante para los fabricantes, y que deben tener en cuenta a la hora de realizar construir estos scaffolds.

RESUM

En el present projecte s'ha realitzat un estudi de CFD en scaffolds dissenyats en impressores 3D y que s'utilitzen en biorreactors de perfusi3n. Per realitzar aquest estudi s'han empleat dos tipus de programes de càlcul computacional, COMSOL y FEMPAR, un codi lliure executable en el entorn Linux, sense interface grfica, que permet realitzar simulacions en parallel mitjançant la tcnica de descomposici3n de dominis.

En aquest treball es pretén demostrar la validesa dels resultats obtinguts en la simulaci3n de scaffolds comparant els obtinguts ambd3s programes, verificant aix la independència d'aquests respecte del programa utilitzat. Per realitzar-ho s'han estudiar diferents geometries. Algunes d'aquestes geometries presenten una sèrie de imperfeccions amb les quals es pretén simular els defectes que poden produir els processos de fabricaci3n amb els que es construeix el scaffold. Amb aix3 es vol demostrar que els esforços que patir el scaffold seran de major magnitud en aquestes zones. Detall que ha de ser important pels fabricants, y que han de tenir en compte a la hora de construir aquets scaffolds.

ABSTRACT

In the following project a study was done by CFD's to try and create scaffolds designed by 3D printers that are used in bioreactors of perfusion. To perform this study we have used two types of calculus computer programs, COMSOL and FEMPAR. FEMPAR is software tool without an interface with operating system Linux. A free executable code in the environment Linux, without graphical interface, which allows to realize simulations in parallel by means of the technology of decomposition of domains.

This project tries to demonstrate the validity of the results obtained in the simulation of scaffolds comparing the obtained ones with both programs, checking this way the independence of these results concern of the used program. Using the aforementioned tools we were also able to study different geometries. Some of these geometries presented some imperfections which in turn caused minor defects during the fabrication process of the scaffolds. In these defected zones the force that is supported by the scaffolds is larger than in other, non-defected zones.. It is vital that these details are taken into account by manufacturers during the production and termination phase of the scaffolds.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría expresar que personalmente este trabajo ha sido muy satisfactorio para mí, ya que me ha servido de gran ayuda para ampliar mis conocimientos en el ámbito del CFD, que aunque fuese un tema en el cual no tenía muchos conocimientos antes de realizar este trabajo, era una temática en la que quería profundizar y adquirir mayores conocimientos, lo cual creo que he conseguido.

Dicho esto me gustaría agradecer a Javier Príncipe y Ricardo Torres, como tutor y cotutor respectivamente, su total disponibilidad para resolver cualquier tipo de dudas o problemas y amabilidad a la hora de guiarme a lo largo de este proyecto.

OBJETIVOS

Este proyecto tiene como principal objetivo, la realización de análisis hidrodinámicos y tensionales en scaffolds construidos con 3D printing para su uso en biorreactores. Estos análisis se realizarán con dos programas diferentes, uno comercial como es COMSOL y otro de libre distribución, llegando a comparar la eficiencia de cada uno de ellos.

Para ello se analizarán distintos casos, con distintas geometrías y peculiaridades. Empezando con un caso con una geometría más básica y terminando por uno otro con alguna complejidad.

En definitiva los objetivos serán los siguientes:

- 1) Discretizar la geometría con la malla más óptima para cada caso.
- 2) Observar las grandes variaciones que se producen en los valores obtenidos, al aplicar una serie de imperfecciones en los hilos del Scaffold.
- 3) Comparar los resultados observados con COMSOL con los que se han obtenido con el FEMPAR, comparando la rapidez de cálculo y la precisión y eficiencia del análisis.

CAPÍTULO 1:

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se explicaran los fundamentos básicos e ideas que se han llevado a cabo para realizar este trabajo:

1.1. Scaffolds en 3D printing

Los scaffolds están formados por una serie de superficies porosas, que se utilizan como soporte en biorreactores, para ayudar a la regeneración y proliferación celular dentro de estos. En los últimos años se están llevando a cabo varios estudios el ámbito de la ingeniería de tejidos y fluidos, en los que se pretende encontrar las condiciones de diseño óptimas que deben tener estos scaffolds. Estas condiciones deben ayudar a dejar pasar los nutrientes que alimentan a las células que se encuentran en el interior, y también deben favorecer al crecimiento y migración de éstas.

Los scaffolds considerados en este trabajo se diseñan mediante técnicas de impresión 3D, las cuales a partir de modelos diseñados en CAD, tratan de construir objetos sólidos utilizando la inyección polímeros generalmente, y que siguen una serie de trayectorias capa por capa.

En definitiva, los scaffolds deben proporcionar las propiedades físicas y mecánicas idóneas para el crecimiento celular. Algunas de estas propiedades y consideraciones son las que se estudiaran es este proyecto,

como la aparición de posibles rugosidades o imperfecciones causadas por la impresión 3D.

Durante los últimos años y cada vez más los estudios de scaffolds usados en biorreactores y diseñados con impresoras 3D, va en aumento.

Algunos de estos estudios coinciden en que para que las características de un scaffold sean idóneas, debe tener: una buena macro estructura que promueva la proliferación celular, que su superficie porosa sea suficientemente optima tanto para favorecer esta regeneración del tejido como para evitar la oclusión de ciertos poros y por último que su morfología permita que estas células se asienten sin ningún tipo de problema.

La calidad de los scaffolds, que generalmente tendrán formas circulares o hexagonales, se medirá por su porosidad, estos poros deberán medir entre 0.5 mm y 1 mm. (Tseng, et al. 2008)

Existen nuevas técnicas para diseñar estos scaffolds, en las que se usan todo tipo de polímeros naturales. Una de estas nuevas técnicas es la que se usa mediante el software UGS NX 6.0. (Tseng, et al. 2008)

Tal y como se pretende hacer en este trabajo, hay algunos estudios en los que se ha demostrado que los máximos valores de las tensiones se aprecian en aquellos lugares en los que el scaffold sufre un defecto a causa del proceso de fabricación, es por eso que uno de los análisis más interesantes que al respecto, es averiguar como reducir estos defectos en el proceso de fabricación para de esta manera, diseñar un scaffold que pueda repartir de manera uniforme estos esfuerzos. (Voronov, et al. 2010)

Para realizar los análisis que se recogerán en este proyecto, se ha tomado como punto de partida un TFG de una antigua alumna, el cual tenía como título: "Estudio y Diseño de un biorreactor con Scaffolds Construidos con 3D Printing".

En este trabajo se estudiaron entre otras cosas las influencias de la porosidad y la geometría, haciendo una breve referencia también a la importancia de las posibles apariciones de rugosidades en los scaffold., tema en el que se quiere hacer inciso en este trabajo.

Las propiedades del tipo de fluido estudiado además de los parámetros de las condiciones de contorno que se utilizarán , tienen origen en el anterior proyecto. También se han cogido como referencia algunas de las dimensiones del scaffold y del cilindro que lo contiene.

1.1. Mecánica de Fluidos

Antes de introducirnos de lleno en el análisis computacional, es conveniente saber algunos conceptos y leyes básicas de la mecánica de fluidos que se utilizaran en este proyecto:

1.2.1. Tipos de los fluidos

Los fluidos se pueden se pueden dividir en diferentes tipos o grupos según distintas magnitudes y propiedades físicas. A continuación se muestran algunas de estas clasificaciones, tales como la viscosidad, la densidad y el número de Reynolds:

- a) La viscosidad es la propiedad que representa la resistencia interna de un fluido a su movimiento. Esta resistencia se crea cuando el fluido se mueve en contacto con otro cuerpo, creando una fuerza de fricción en la superficie de contacto opuesta a este movimiento. Según la viscosidad se pueden distinguir dos tipos de fluidos: newtonianos o no newtonianos.
 - Newtonianos: Son aquellos en los que se considera que la viscosidad es constante en el tiempo y por lo tanto en los que su relación entre los esfuerzos y la velocidad de deformación es lineal. El agua seria un claro ejemplo de este tipo de fluido.
 - No Newtonianos: Son los que no tienen un viscosidad constante, que puede variar por el cambio de temperatura y de la tensión de corte que se le haya aplicado.
- b) La densidad es la cantidad de masa por unidad de volumen que hay en una sustancia. Según esta magnitud podemos clasificar los fluidos en compresibles o incompresibles.
 - Compresibles: Se dice de los fluidos que tienen una densidad y por lo tanto, un volumen variable.
 - Incompresibles: Los fluidos incompresibles son aquellos en los que la densidad permanece aproximadamente constante. Es decir a lo largo de todo el movimiento el volumen de fluido permanece prácticamente inalterado.

- c) El número de Reynolds es un número adimensional que sirve para relacionar las fuerzas inerciales con las fuerzas viscosas. Este valor relaciona entre sí la densidad, la velocidad, la dimensión y la viscosidad del fluido. Sirve como parámetro clave para determinar que régimen de flujo tienen los fluidos:

$$Re = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{\rho \cdot u_{media} \cdot D}{\mu} \quad (1)$$

donde ρ es la densidad, μ la viscosidad dinámica, D el diámetro y u la velocidad.

Según esta magnitud se pueden dividir en laminares o turbulentos:

- Régimen laminar: Se produce cuando el movimiento del fluido es ordenado y está caracterizado por unas líneas de corriente suaves. Se considera que un fluido que circula por una tubería circular, tiene régimen laminar cuando su número de Reynolds es inferior o igual a 2300. $Re \leq 2300$
- Régimen turbulento: Aparece cuando el movimiento del fluido es muy desordenado, generalmente cuando hay muchas fluctuaciones en la velocidad. Cuando el $Re \geq 4000$.

El cambio de régimen laminar a turbulento, no se produce de manera inmediata, sino que en este cambio el flujo se encuentra en una región en la que hay régimen laminar y turbulento. Cuando el flujo se encuentra en este impasse, se dice que se encuentra en régimen de transición, esto sucede cuando el número de Reynolds es: $2300 < Re < 4000$. En la Figura 1 se ilustran los distintos tipos de flujo.

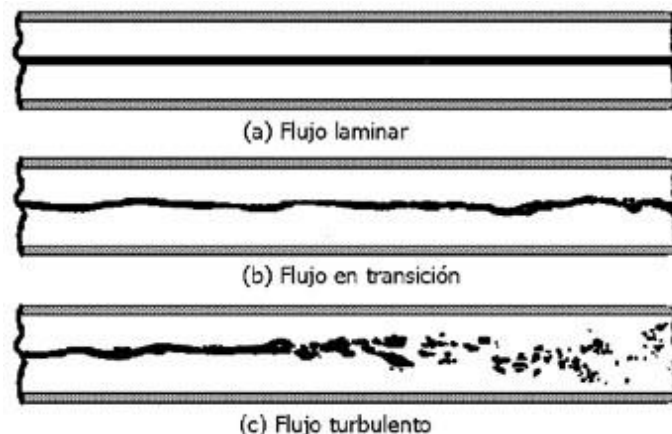


Figura 1. Representación de los tipos de flujos según su régimen

- d) Una última clasificación a tener en cuenta es si el flujo es estacionario o no-estacionario. Los flujos estacionarios son los que en un punto dado del espacio, conservan sus propiedades frente al paso del tiempo. Mientras que los flujos no estacionarios son todo lo contrario y sus propiedades en ese punto pueden variar.

1.2.2. Ecuaciones de Navier Stokes

Las ecuaciones de Navier Stokes están formadas por las ecuaciones de conservación de la masa y las ecuaciones de momento.

Estas ecuación se utilizan para encontrar las incógnitas de velocidad y presión.

El campo de velocidades nos ayuda a describir el movimiento del fluido en cada instante de tiempo. En coordenadas cartesianas presenta el siguiente aspecto:

$$\vec{c}(x, y, z, t) = u(x, y, z, t)\vec{i} + v(x, y, z, t)\vec{j} + w(x, y, z, t)\vec{z} \quad (2)$$

a) Conservación de la masa

La conservación de la masa debe ser válida para todo tipo de volumen de control, es por eso que si la expresamos como una expresión diferencial, se obtiene la ecuación de continuidad, la cual es válida en cualquier punto del dominio de flujo.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{c}) = 0 \quad (3)$$

En este trabajo estudiaremos un fluido incompresible por lo tanto tenemos la siguiente ecuación :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{c} = 0 \quad (4)$$

b) Ecuación de momento

Es una ley de conservación del movimiento. La forman un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales, que describen el movimiento del fluido y que se obtienen aplicando la segunda ley de newton sobre un volumen de control. Su expresión para un fluido incompresible en coordenadas cartesianas es la siguiente:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (7)$$

1.2.3. Ley de Poiseuille

Es una ley que nos permite expresar el flujo laminar de un fluido newtoniano e incompresible, cuando este se encuentra circulando por una tubería cilíndrica de radio R constante y longitud L . Esta ley se obtiene resolviendo las ecuaciones de Navier Stokes presentadas en la sección 1.2.2 en el caso particular del flujo en dicha tubería y se puede escribir como:

$$u(r) = - \frac{\Delta P}{4\mu L} \cdot (R^2 - r^2) \quad (8)$$

que nos permite saber la distribución de las velocidades a lo largo de toda la tubería.

Es necesario comentar que el gradiente de presiones ΔP es la diferencia de presiones entre la entrada y la salida de la tubería. En los casos, como los que se analizarán en este trabajo, en los que el fluido circula a través de una tubería esta diferencia de presiones será negativa. Por lo que se dirá que se ha producido una caída de presión, dado que a medida que avanza el fluido este va perdiendo potencia. Esta pérdida es causada por los esfuerzos viscosos que sufre el fluido en contacto con las superficies del cilindro. Se expresa del siguiente modo:

$$\Delta P = P_2 - P_1 = \frac{8 \cdot \mu \cdot L \cdot u_{media}}{R^2} \quad (9)$$

donde R es el radio del cilindro, μ es la viscosidad dinámica y L la longitud del tramo de tubería que se está analizando.

Por otro lado, cuando $r=R$ es decir en un punto de la pared del cilindro, obtenemos que $u(r) = 0$, mientras en el centro de la tubería la velocidad de avance del fluido es máxima, ya que $r=0$.

$$u(0) = -\frac{\Delta P}{4\mu L} \cdot (R^2 - 0) \rightarrow u_{max} = -\frac{\Delta P}{4\mu L} \cdot R^2 \quad (10)$$

Por lo tanto sabiendo el valor de la velocidad máxima podemos expresar la velocidad en función del radio de la siguiente manera:

$$u(r) = \frac{u_{max}}{R^2} \cdot \left(1^2 - \frac{r^2}{R^2}\right) \quad (11)$$

También podemos hallar la velocidad media de avance del fluido, integrando la expresión del caudal:

$$u_{media} = \frac{\dot{V}}{\pi R^2} \quad \text{donde } d\dot{V} = 2\pi \cdot r dr \cdot u(r) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} u_{media} &= \frac{1}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} \int_0^R u \cdot r dr d\theta = \frac{2\pi}{\pi R^2} \int_0^R u \cdot r dr \\ &= \frac{2}{R^2} \cdot u_{max} \int_0^R \left(r - \frac{r^3}{R^2}\right) dr \\ &= \frac{2 \cdot u_{max}}{R^2} \cdot \left(\frac{r^2}{2} - \frac{1}{R^2} \cdot \frac{r^4}{4}\right) \Big|_0^R \\ &= \frac{2 \cdot u_{max}}{R^2} \cdot \left(\frac{R^2}{2} - \frac{1}{R^2} \cdot \frac{R^4}{4}\right) = 2 \cdot u_{max} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{4}\right) \\ &= \frac{2}{4} \cdot u_{max} = \mathbf{0.5 \cdot u_{max}} \end{aligned} \quad (13)$$

1.2. Diseño del Scaffold

Gracias al aprendizaje y conocimientos que se han adquirido durante estos años en las escuela y a la infinidad de posibilidades y operaciones que nos permite realizar, se ha decidió realizar el diseño del scaffold a través de SolidWorks . Se ha considerado este programa de CAD como idóneo, ya que permite guardar perfectamente documentos IGES, para que posteriormente sean exportados a los programas de análisis computacional, que en este caso son COMSOL GID.

La geometría de estos scaffolds está inspirada en otros trabajos anteriores, pero se ha adaptado a las necesidades de este proyecto. Acorde con el objetivo de éste, se ha creído conveniente crear únicamente dos capas del scaffold, ya que de esta forma se pueden obtener resultados muy significativos que posteriormente pueden ser interpolados a un scaffold de mayores dimensiones.

De forma general se han creado tres tipos de geometría. La primera consta de un scaffold de dos capas , el cual estaría envuelto en un cilindro por el que circula el fluido y que representa un tubo del bioreactor.

Por otro lado, en la segunda geometría se han decidido representar solamente dos hilos de la capa del scaffold más cercana a la zona de entrada del fluido. Uno de estos dos hilos presenta una serie de imperfecciones, con las cuales se pretende representar la rugosidad que puede generar la impresora 3D a la hora de construir la geometría. En este caso se han creado 4 situaciones distintas con diferentes tipos de rugosidades en cada una de ellas.

Por último se ha creado un último diseño, en el que se representa únicamente una capa, el que recibe primero el impacto del fluido, y que se ve afectado por una serie de imperfecciones a lo largo de todos sus hilos.

En el Anexo A se puede observar más detalladamente cómo se han confeccionado dichos modelos.

1.3. Dinámica de fluidos computacional

1.3.1. *Objetivo del CFD*

El CFD es un campo de la mecánica de fluidos, que tiene como objetivo calcular las ecuaciones de flujo de fluidos a través de cálculos realizados por ordenadores, basándose en un método de discretización. Este método

consiste en crear una especie de mallado a lo largo del dominio que se quiere analizar, dividiendo éste en pequeños regiones o volúmenes de control, llamadas celdas que están unidas por nodos. A continuación se resuelven las ecuaciones en cada uno de ellos, obteniendo de esta forma una solución aproximada y con error muy pequeño, pero sobretodo nos permite obtener estos resultados con una velocidad extremadamente rápida en comparación con los cálculos que se llevan a cabo.

1.3.2. Etapas del CFD

El CFD sigue una serie de etapas generales:

1. Se elige el dominio computacional a analizar, como el que muestra la Figura 2.
2. Se especifica el tipo de fluido que se analizará así como sus propiedades.
3. Se establecen una serie de condiciones de contorno a lo largo de los lados o las superficies del dominio. Estas condiciones vienen definidas generalmente por la presión o la velocidad.
4. Se genera la malla para dividir el dominio en distintas partes.
5. Se elige el método de cálculo a seguir y se resuelven todas las ecuaciones en cada uno de los nodos.
6. Por último se analizan y se valoran los resultados obtenidos en cada punto de la malla. Estos análisis se realizan de forma gráfica, ayudándonos, de esta manera, a obtener una comprensión más sencilla y de los resultados obtenidos, pudiéndolos comparar más fácilmente con otros.

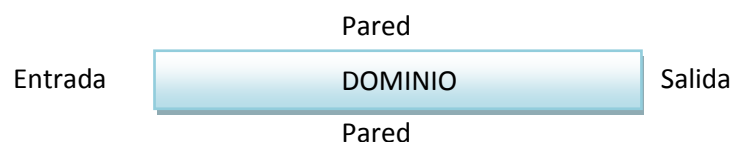


Figura 2. Dibujo tipo de un dominio para análisis en CFD.

1.3.3. Métodos de discretización

Como ya se ha dicho el análisis computacional tiene como objetivo resolver una serie de ecuaciones diferenciales parciales a lo largo del dominio a analizar. Para resolverlas existen varios métodos de discretización, pero en este trabajo se aplicará el método de los elementos finitos.

Como todos los métodos de discretización se trata de dividir el dominio en distintos elementos celdas, que unidos entre si a través de nodos forman una malla, pero en este caso por norma general esta subdivisión no tendrá

ningún tipo de orden ni de patrón, por lo que estaremos hablando de una malla no-estructurada. Aunque este tipo de mallado es más complejo de realizar que un mallado estructurado, a nivel computacional, ya que requiere mucha más memoria, su gran ventaja es que se adapta muy fácilmente a geometrías muy diversas y complejas. Por lo tanto es idóneo para trazar las mallas en los scaffolds que se analizarán posteriormente. En la Figura 3 se ilustran estas diferencias entre ambos tipos de mallas.

Las celdas de la malla pueden ser de distintos tipos, en caso de geometrías 3D como las de este trabajo, las celdas más comunes son las hexaédricas o las tetraédricas, pero también existen otras con formas prismáticas o piramidales.

En los cálculos que se observarán a partir del segundo capítulo, se ha decidido utilizar celdas tetraédricas, ya que se son las más fácil de aplicar de manera automática, y la existencia de altos gradientes dentro de un régimen laminar no afectarán a los resultados que tendrán una cierta convergencia.

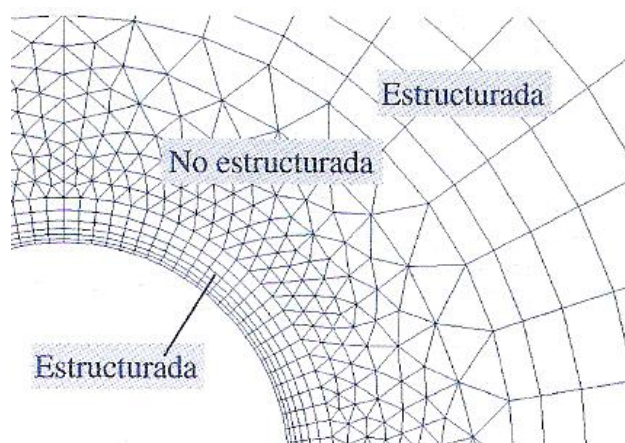


Figura 3. Representación de los distintos tipos de mallas.

1.3.4. GID

GID es un programa comercial que tiene como utilidad el cálculo de pre y post procesos en análisis computacional, válido para todo los ámbitos de la ciencia y de la ingeniería, tales como la mecánica de fluidos, el cual es el engloba este proyecto.

En este trabajo utilizaremos GID básicamente en su función de pre proceso, el cual posteriormente se desarrolla con FEMPAR como veremos en el siguiente apartado.

En esta etapa se establecerán las condiciones de contorno en las caras y las superficies del domino, y también se generará la correspondiente malla para cada caso. De esta manera el programa quedará totalmente listo para que se puedan lanzar los cálculos.

En el capitulo dos de esta memoria se explica más detalladamente que condiciones de contorno y que tipos de malla se han empleado en cada ocasión.

1.3.5. FEMPAR

Es un programa de cálculo computacional, basado en el método de los elementos finitos, y en torno al cual girará todo este proyecto. Actualmente se encuentra en fase de desarrollo, y en su futuro se pretende ser un código de distribución destinado al ámbito de la investigación y académico.

Se basa en un algoritmo de descomposición de dominios programado en el lenguaje FORTRAN y se ejecuta en el entorno Linux sin interface gráfica. Tiene una gran diferencia a los programas de simulación que se encuentran actualmente en el mercado, y es que cada vez que se desea realizar o cálculo o dejar de hacerlo, el usuario puede configurarlo directamente desde el código sin ningún tipo de restricciones. Otra gran virtud a destacar, es que este código nos permite dividir los cálculos en distintas partes, de este modo se puede aprovechar al máximo el rendimiento de la computadora en la que se está ejecutando dicho código utilizando el máximo de procesadores posibles. En el tercer capítulo se detallará que división es la más idónea para nuestro proyecto.

Este programa está destinado únicamente al cálculo computacional, por lo tanto no consta de ningún tipo de pre ni post proceso. En este proyecto no se estudiará como esta realizado en código si no su eficacia y validez de sus herramientas de cálculo.

1.3.6. PARAVIEW

Es un programa de visualización, que nos permite representar y analizar los resultados proporcionándonos un gran abanico de opciones a través de su interface. Nos da la posibilidad de observar los resultados de todas las variables que hemos decidido analizar, en cada paso de tiempo y en cada punto y dirección del dominio analizado. Para verlos más claramente, nos da la opción de visualizar estos resultados con superficies, volúmenes o con la mallado , proporcionándonos al mismo tiempo la posibilidad de realizar todo tipo de planos y superficies de cortes en el lugar que deseemos a lo largo del dominio. Los valores obtenidos se pueden clasificar en una escala o leyenda de colores confeccionada a medida, para facilitar la comprensión al usuario. Otras opciones interesantes a destacar son las posibilidades de ver las diferentes líneas de flujo por donde circula el fluido, la obtención de

graficas que representan los resultados de las variables analizadas a lo largo del tiempo de simulación o que pueden relacionar dichas variables entre sí.

Es el programa elegido para el post proceso de los cálculos realizados con FEMPAR.

1.3.7. COMSOL

Es un programa muy completo , que nos permite realizar al completo todas las etapas de un análisis de CFD, desde el diseño de nuestro dominio a través de herramientas CAD , hasta la visualización de los resultados, pasando por el cálculo y resolución de estos mismos.

El diseño en CAD es muy similar y a la vez compatible al de SolidWorks. A través de una serie de herramientas simples nos permite diseñar todo tipo de figuras. Si nuestro dominio se ha diseñado con otro tipo de programa, COMSOL nos da la posibilidad de importarlo.

A continuación, una vez tenemos diseñado el dominio deseado, se debe seleccionar el tipo de análisis que deseamos realizar.

Una vez elegido el tipo de problema COMSOL nos pide que le indiquemos las condiciones del fluido, los lugares de entrada y salida de este a través del dominio y las condiciones de contorno deseadas.

El siguiente paso es crear la malla, para ello COMSOL nos proporciona distintas opciones de malla, con medidas ya establecidas.

Por último se calculan los parámetros numéricos a través del algoritmo que tiene incorporado este programa y se visualizan los resultados. Las opciones que nos proporciona la interface de COMSOL, a la hora de visualizar los resultados, son muy similar a las de PARAVIEW anteriormente comentadas.

CAPÍTULO 2:

ANÁLISIS

COMPUTACIONAL CON

COMSOL

En este capítulo se mostrarán todos los pasos y consideraciones que se han seguido para realizar el análisis computacional con COMSOL. Los resultados obtenidos en este apartado servirán como referente para comparar los resultados obtenidos con FEMPAR que se mostrarán en el siguiente capítulo.

En definitiva esta comparativa pretende llevar a cabo el cumplimiento del principal objetivo del proyecto, que como bien se ha comentado es demostrar la independencia de los resultados respecto del programa utilizado.

2.1. Consideraciones

Inicialmente se ha diseñado una geometría relativamente sencilla, pero que a su vez nos permitirá sacar suficientes conclusiones, para ello se ha creído

conveniente crear un scaffold con dos capas. Esta geometría la llamaremos Scaffold General, y sus dimensiones están especificadas en los planos adjuntos.

Se realizará un estudio laminar y estacionario, con un fluido no newtoniano e incompresible, al cual se le aplicarán las mismas propiedades físicas que el agua.

Como condiciones generales de contorno, se aplicará una condición de no deslizamiento tanto en las capas del scaffold, como en las superficies de la tubería por las que circula el flujo.

El dominio que se analizará es solo una porción del bioreactor, por eso es importante tener en cuenta que antes de entrar en éste dominio, previamente el fluido realiza una serie de recorridos. Por lo tanto se cree que cuando este fluido entre en nuestro dominio vendrá definido con un régimen totalmente laminar. Esta será la condición de entrada que se ha aplicado.

2.2. Pasos y proceso a seguir

Los pasos que se han seguido para realizar este cálculo y aplicar las consideraciones y condiciones del apartado anterior, son los siguientes:

1. Primeramente COMSOL, nos pide cual el tipo de problema que queremos analizar. En este caso se desea realizar un estudio en 3D, laminar y estacionario. Para realizar los cálculos el programa resolverá las ecuaciones de Navier-Stokes Ec. 4,5,6 y 7 especificadas en la sección 1.2.2.

2. A continuación exportaremos la geometría, en un fichero IGES que como bien se ha comentado antes ha sido diseñado en SolidWorks.

3. Una vez tenemos importada la geometría debemos generar su negativo.

Aplicando las opciones Boolean Operations → Difference, en las que se sustraerán los dos láminas al resto del dominio, se conseguirá generar este volumen de contorno que deseamos obtener y sobre el que circulará el flujo.

4. Seguidamente debemos aplicar todas las condiciones que se han tenido en cuenta en el anterior apartado.

Para nuestras condiciones de contorno debemos seleccionar la opción de "No Slip" en todas las superficies del "Wall".

Los valores de las propiedades físicas aplicadas son:

$$\rho = 1000 \frac{Kg}{m^3} \quad (14)$$

$$\mu = 0.001 Pa \cdot s \quad (15)$$

Se ha establecido como entrada la superficie del cilindro situada a -5 mm del origen de coordenadas, de manera que el fluido avanzará a través del eje Z hacia valores positivos de éste. Para aplicar que el fluido circulo ya con régimen laminar, COMSOL nos proporciona la opción "Laminar in-flow", en la cual hemos establecido estos parámetros:

$$u_{media} = 0.0005 m/s \quad (16)$$

Este valor se ha encontrado a través de la ley de Poiseuille (Ec.13), explicada en el apartado 1.2.3. Se ha decido una velocidad máxima al fluido de 0.001 m/s.

$$L_{entr} = 1 m \quad (17)$$

Esta longitud representa la distancia desde la cual el fluido ha comenzado a circular, se le ha asignado este valor, ya que es mas que suficiente para que el flujo consiga un régimen laminar.

Para la condición de salida se ha seleccionado la cara opuesta a la entrada, que se situará a 5 mm del origen. Donde se le ha aplicado una condición de presión nula.

$$p_{salida} = 0 Pa \quad (18)$$

5. Para el mallado se ha seleccionado una malla tetraédrica FINE, donde se han obtenido un total de 528.767 elementos o celdas.
6. Por último se ha seleccionado una solución de cálculo iterativo.

2.3. Análisis de resultados

Una vez realizados los pasos se han obtenido los siguientes resultados.

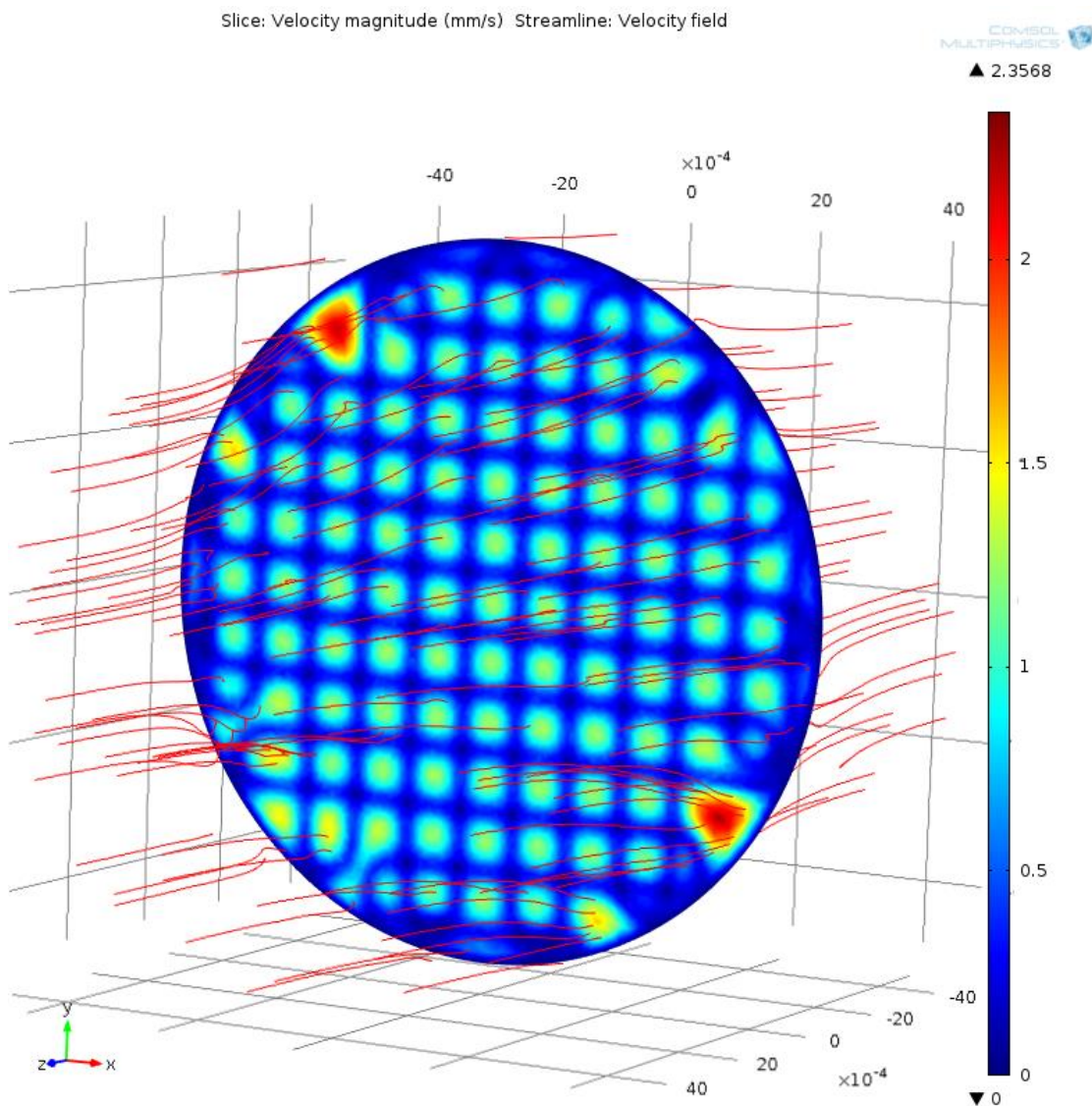


Figura 4. Representación de las velocidades en el plano $Z=0$ y de las líneas de flujo calculadas con COMSOL.

La Figura 4, muestra la velocidad que lleva el fluido en el plano que se encuentra en el origen de coordenadas, justo entre las láminas del scaffold. Las líneas de flujo muestran claramente el avance del fluido por los huecos que generan las dos láminas, sobre los que la velocidad es 0.

Se aprecia como las velocidades máximas se encuentran esquina superior izquierda y en la inferior derecha, ya que son los lugares donde has más espacio para que este avance, dada la geometría de las dos láminas cruzadas.

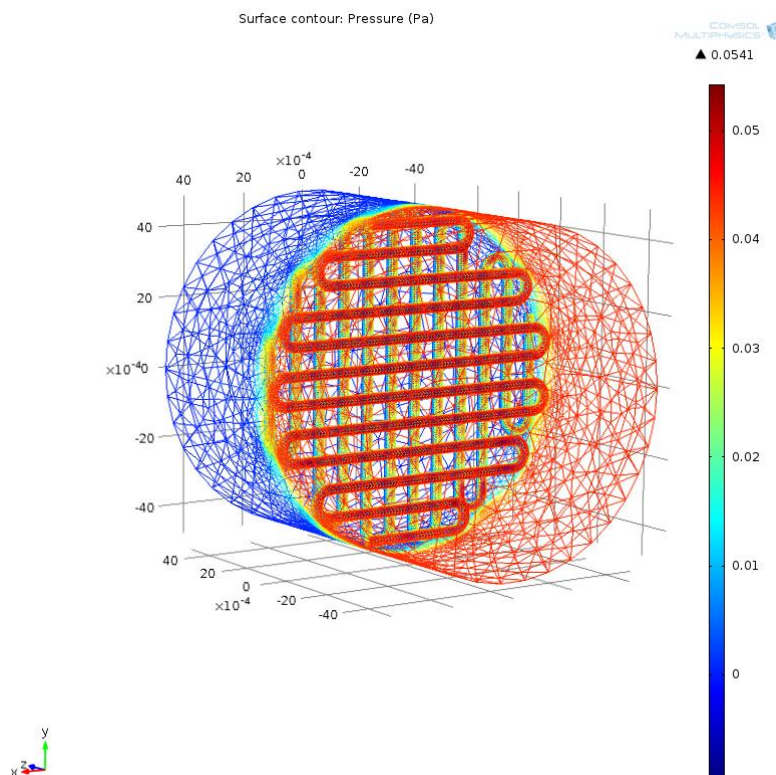


Figura5. Representación tridimensional de las presiones en todo el dominio calculadas con COMSOL.

En la Figura 5 se representa la presión a lo largo de todo el dominio. Se observa que la presión a la salida 0, dado que era la condición de contorno que le habíamos impuesto previamente.

Como es lógico, se aprecia que la primera capa del scaffold es la que se encuentra sometida a mayor presión , ya que es la primera en recibir el empuje del fluido.

Cuando analizamos los esfuerzos totales con COMSOL, éste nos muestra los valores de las tensiones que sufre el fluido en cada punto, en esta imagen concretamente nos centraremos en aquello que nos interesa el scaffold, que recibirá la reacción de dichos esfuerzos.

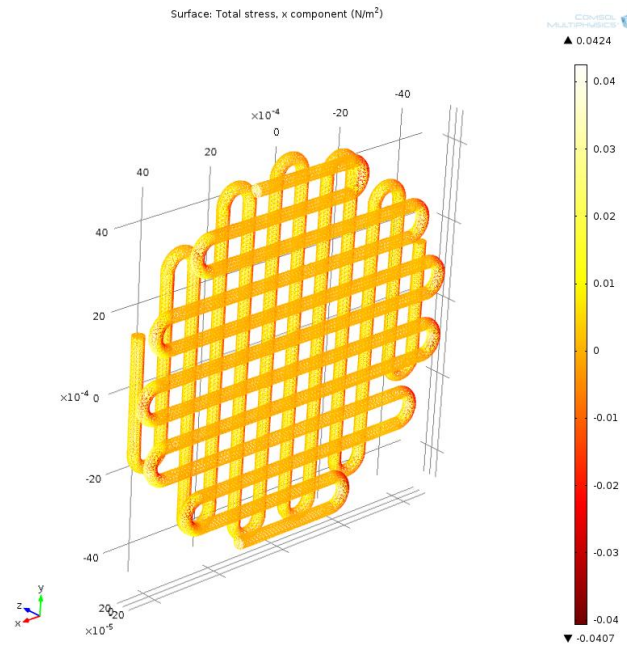


Figura 6. Representación tridimensional de las tensiones totales que sufre el scaffold en la dirección X, calculadas con COMSOL.

Como se observa en la figura 6, los esfuerzos en la dirección X a lo largo del scaffold serán prácticamente despreciables, ya que la dirección de avance del fluido es la dirección Z.

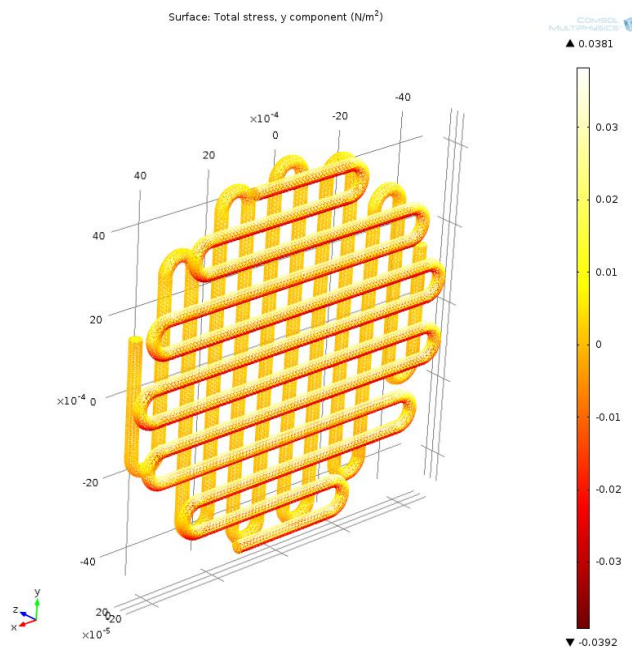


Figura 7. Representación tridimensional de las tensiones totales que sufre el scaffold en la dirección Y, calculadas con COMSOL.

En la Figura 7, observamos la tensiones totales en la dirección Y. Mientras que en la segunda lámina los valores serán prácticamente nulos, tenemos que en la primera capa del scaffold los esfuerzos concentrados en las partes superiores e inferiores de los hilos se compensarán como es lógico ya que al recibir el impacto del fluido, este se desviará de la misma forma tanto en las direcciones positivas como negativas del eje Y.

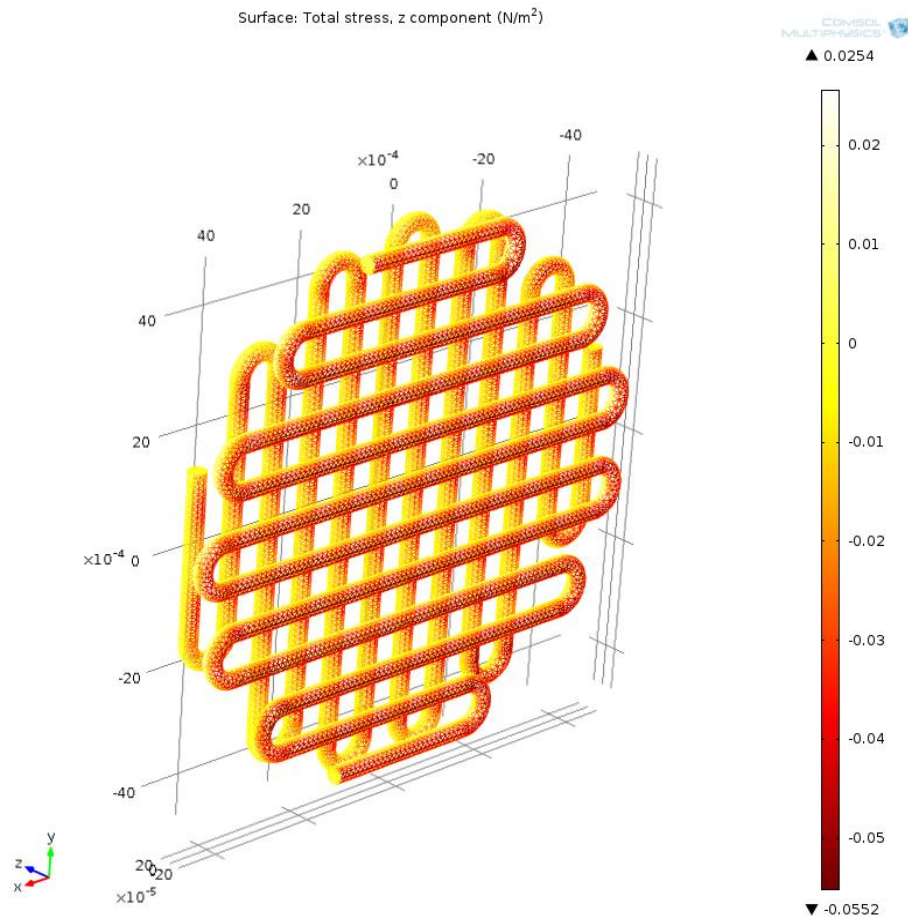


Figura 8. Representación tridimensional de las tensiones totales que sufre el scaffold en la dirección Z, calculadas con COMSOL.

Como se observa en la Figura 8, los esfuerzos totales en el eje Z, o lo que es lo mismo en la dirección en la que avanza el fluido, estarán más o menos uniformemente distribuidos a lo largo del scaffold. Los valores representados tanto en la parte frontal de la primera capa como en los espacios de la segunda lámina que quedan expuestos al impacto directo del fluido, son negativos por lo que afirmamos que en estos puntos el scaffold estará sometido a compresión. Por otra parte, observamos que en las partes posteriores de ambas capas los esfuerzos irán en la dirección opuesta al avance del fluido, lo cual generará una resistencia sobre su avance.

CAPÍTULO 3:

ANÁLISIS

COMPUTACIONAL CON

FEMPAR

En este capítulo, en el cual reside la esencia de este proyecto, se reflejarán todos los procesos que se han seguido para el análisis con FEMPAR. Se demostrarán las virtudes y la eficiencia de este software, utilizando en mismo caso de un scaffold con dos capas como en el capítulo anterior.

3.1. Consideraciones

Las consideraciones sobre el estudio y las condiciones de contorno que se aplicaran serán las mismas que se han tenido en cuenta en el análisis con COMSOL.

La gran diferencia y lo más importante a tener en cuenta, es que todos estos parámetros se le aplicarán a las condiciones deberán estar expresados en las mismas unidades con las que se ha generado la geometría, en este

caso en mm, para que de esta manera podamos considerar válidos los resultados obtenidos. Por lo tanto los resultados que se obtendrán vendrán expresados en unidades distintas a las del capítulo anterior, pero eso no supondrá ningún impedimento a la hora de comparar los dos programas.

3.2. Partes y procesos a seguir

Para realizar los cálculos podríamos dividir el proceso en dos amplias partes: una correspondiente a GID y otra a FEMPAR.

3.2.1 Funciones de GID en el CFD

Este proceso se utilizará GID para aplicar las condiciones de contorno, que posteriormente se traspasan a FEMPAR.

1. Primero se importa la geometría, tal y como se ha hecho en el caso de COMSOL, se utilizará un fichero IGES.
2. Se genera un volumen de contorno a través de las herramientas Create→ Volume→ By contour. Esto nos proporciona igual que antes el volumen que deseamos analizar.
3. Seleccionamos FEMPAR como "Type Problem", de esta manera lo que haremos, será darle un destino a todos los parámetros de mallado y condiciones de contorno que apliquemos.
4. Se configura el problema data asignando un valor de 4 a "nvalu" y "ncode" para que tenga en cuenta el número de incógnitas con el que nos encontramos, ya que para este caso el problema lo resolveremos con una ecuación de Navier-Stokes en 3D, donde tendremos como incógnitas las tres direcciones de la velocidad y la presión (u_x, u_y, u_z, p).

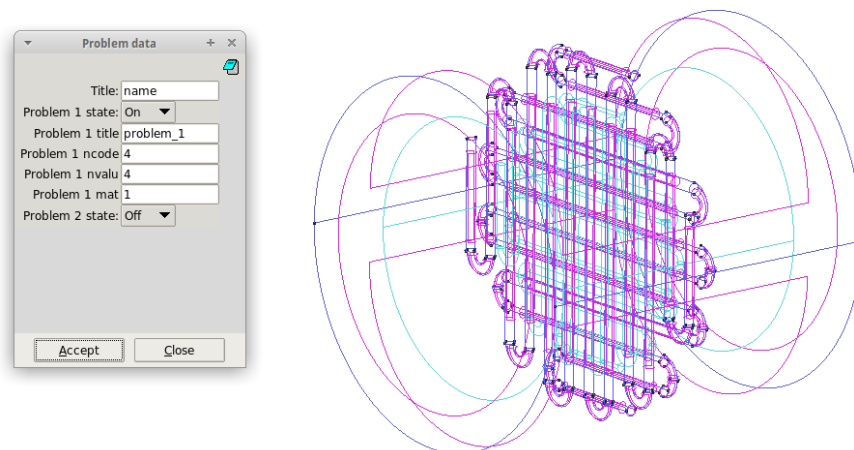


Figura 9. Captura de pantalla de la ventana Problem Data de GID.

5. La imposición de las condiciones de contorno se debe realizar de la siguiente forma. Dentro del apartado "Conditions" selecciona un problema con 4 incógnitas que aplicaremos en las distintas superficies. Una vez hecho esto ya sea aplicable para toda la superficie o para sus caras, debemos asignarle un código y un valor a estas incógnitas. En nuestro caso se le dará un valor de 0 o 1 al código. Lo cual significará que dándole código 1 a esa incógnita, deberá tener un dirichlet que posteriormente asignaremos, y dándole código 0 estaremos dejando esa incógnita como valor libre.

Para aplicar la condición de no deslizamiento, se han seleccionado todas las superficies del dominio exceptuando las "tapas" del cilindro, dejando la presión como valor libre y fijando las tres velocidades con valor 0.

Seguidamente para imponer la condición en la entrada, se ha seleccionado la superficie de la tapa del cilindro, volviendo a dejar la presión como valor libre y fijando las tres velocidades, pero en este caso se le ha asignado un valor de 1 a la velocidad en la dirección del flujo u_z , y 0 para u_x y u_y

Por otra parte, es necesario que se indiquen cuales son las caras que se verán afectadas por las tensiones que posteriormente se calcularán con el programa.

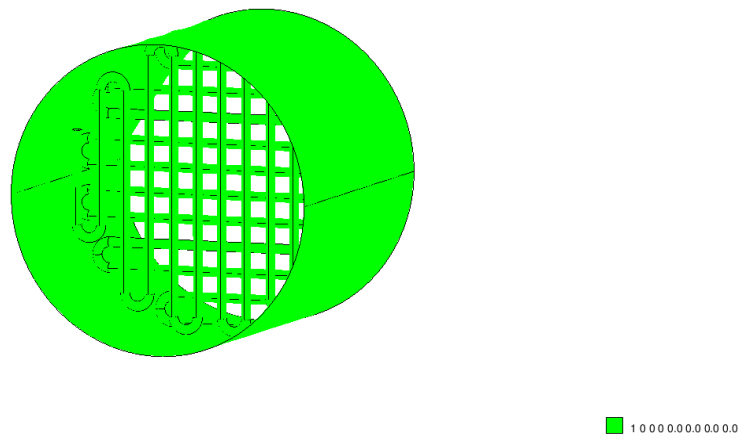


Figura 10. Captura de pantalla en GID donde se muestran las condiciones de contorno aplicadas sobre las caras del dominio.

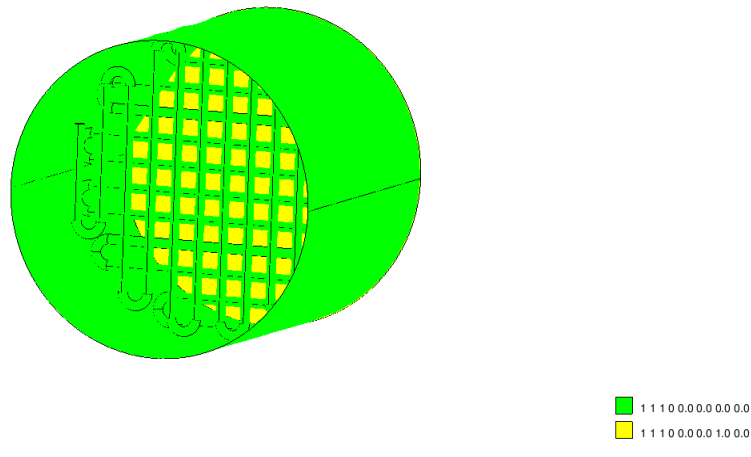


Figura 11. Captura de pantalla en GID donde se muestran las condiciones de contorno aplicadas sobre las superficies del dominio

6. Seguidamente ya se puede generar la malla. Para este primer caso se ha seleccionado una malla no-estructurada formada por elementos tetraédricos de tamaño 0.9 y un error cordal de 0.1, obteniendo de esta forma una malla con 38341 nodos y 185744 elementos.
7. Finalmente para finalizar la etapa con GID, se seleccionará la opción "Calculate" con la que copiaremos los archivos de malla y condiciones a FEMPAR, tal y como se había comentado en el paso 3.

3.2.2 Estudio con FEMPAR

La principal utilidad que tiene FEMPAR, es que permite la paralelización del proceso de cálculo a gran escala. Se ha decidido dividir el proceso en 8 partes, ya que la máquina en la que se ha realizado este análisis consta de cuatro procesadores y con ello conseguimos procesar cada una de las partes utilizando un 50% de capacidad, sin necesidad de dividirlo en más partes ya que el problema no nos genera esa necesidad. Como se observa en la siguiente tabla también se ha probado de dividir el dominio en 4 partes, de forma que el tiempo de cálculo era mayor, mientras que dividiéndolo en 16 era prácticamente igual que en 8.

Tabla 1. Tiempo de cálculo para cada número de divisiones del dominio.

Partes	Tiempo de cálculo (s)
4	840
8	660
16	630

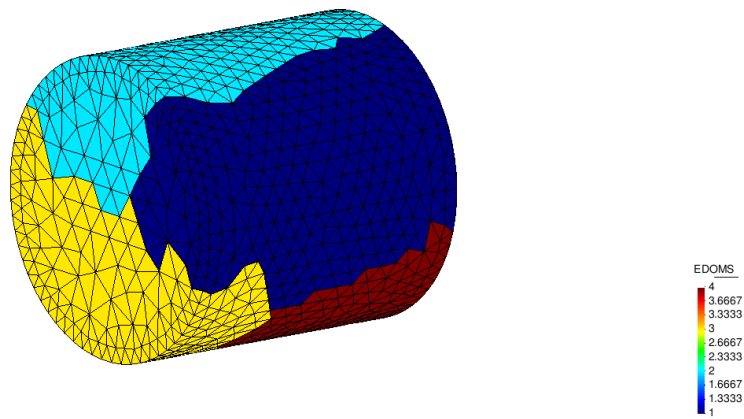


Figura 12. Representación del dominio dividido en 4 partes.

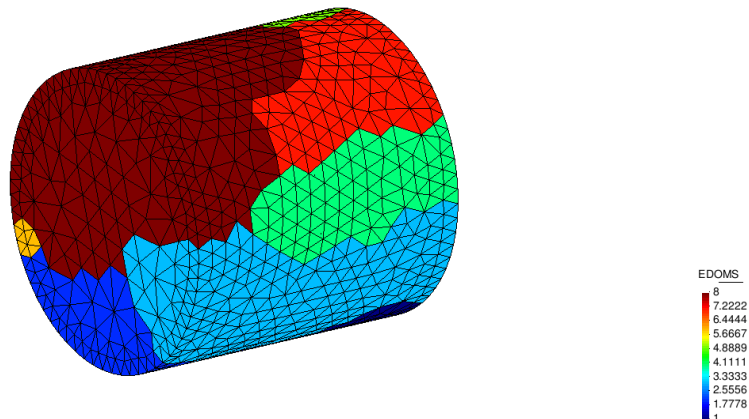


Figura 13. Representación del dominio dividido en 8 partes.

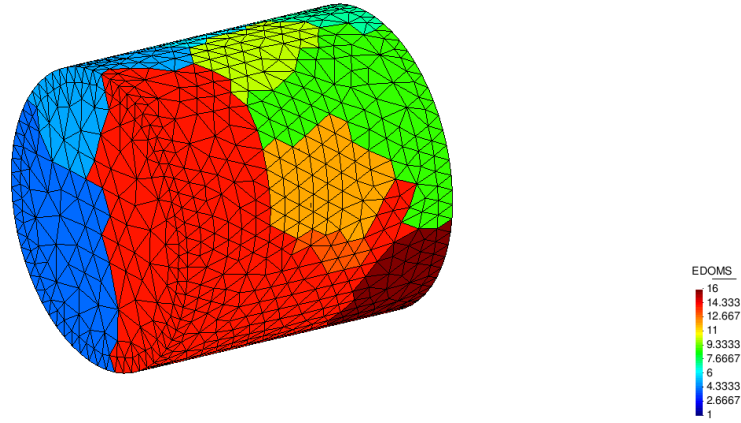


Figura 14. Representación del dominio dividido en 16 partes.

El código que se ha desarrollado para el estudio de este proyecto, nos permitirá calcular las velocidades, presiones y tracciones que sufre nuestro dominio y como bien se ha comentado anteriormente los parámetros y variables que se han introducido en el código vendrán expresados en mm.

Tanto en las presiones o como en las tracciones, los resultados que se obtendrán no serán unidades de fuerza por unidad de superficie, sino que estarán expresados en unidades de velocidad al cuadrado, ya que en el código se divide toda la ecuación de Navier Stokes por la densidad obteniendo de esta manera:

$$\frac{Pa}{\rho} = \frac{\frac{N}{m^2}}{\frac{Kg}{m^3}} = \frac{\frac{Kg \cdot m}{s^2}}{\frac{Kg}{m^3}} = \frac{Kg}{s^2 \cdot m} = \frac{m^2}{s^2} = 10^6 \frac{mm^2}{s^2} \quad (19)$$

Al contrario que COMSOL, en el código se ha expresar la viscosidad cinemática como propiedad del fluido, y que es la relación en entre la viscosidad dinámica y la densidad. Por lo tanto el valor que introduciremos se deduce de la siguiente manera:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{10^{-3} \frac{Kg}{m \cdot s}}{10^{-6} \frac{Kg}{m^3}} = 10^{-6} \frac{m^2}{s} = 10^{-6} \frac{m^2}{s} = 1 \frac{mm^2}{s} \quad (20)$$

Las condiciones de contorno y de entrada se reescribirán en el código a través de las que se habían copiado previamente desde GID. Para imponer un flujo de Poiseuille en la entrada utilizaremos la Ec.13, donde solamente hay que poner el valor de u_{max} que deseemos, en este caso como con COMSOL se ha puesto una velocidad media de 0.0005 m/s , a través de la Ec.21 deduciremos su valor, que volveremos a expresar en mm:

$$u_{media} = 0.5 \cdot u_{max} \rightarrow u_{max} = \frac{0.0005}{0.5} = 0.001 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 1 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \quad (21)$$

La condición de contorno a la salida será la misma que en COMSOL:

$$p = 0 \frac{\text{Kg}}{\text{s}^2 \cdot \text{mm}} \quad (22)$$

Finalmente se pueden modificar los pasos de tiempo que deseemos para resolver el cálculo de manera iterativa y que converja correctamente. Inicialmente se han asignado 5 pasos de tiempo, para asegurar esta convergencia. Los pasos de tiempo correrán de uno en uno entre ellos.

Una vez ya se ha ajustado todos los parámetros se envía a correr el código con los siguientes comandos:

part .O scaffold 8 (para dividir el proceso en partes)

mpirun -n 8 par_nsi.O scaffold > out.log 2>&1 & (para lanzar el cálculo)

3.3 Análisis de los resultados

Los resultados se visualizarán a través de Paraview utilizando las diferentes herramientas que éste nos proporciona.

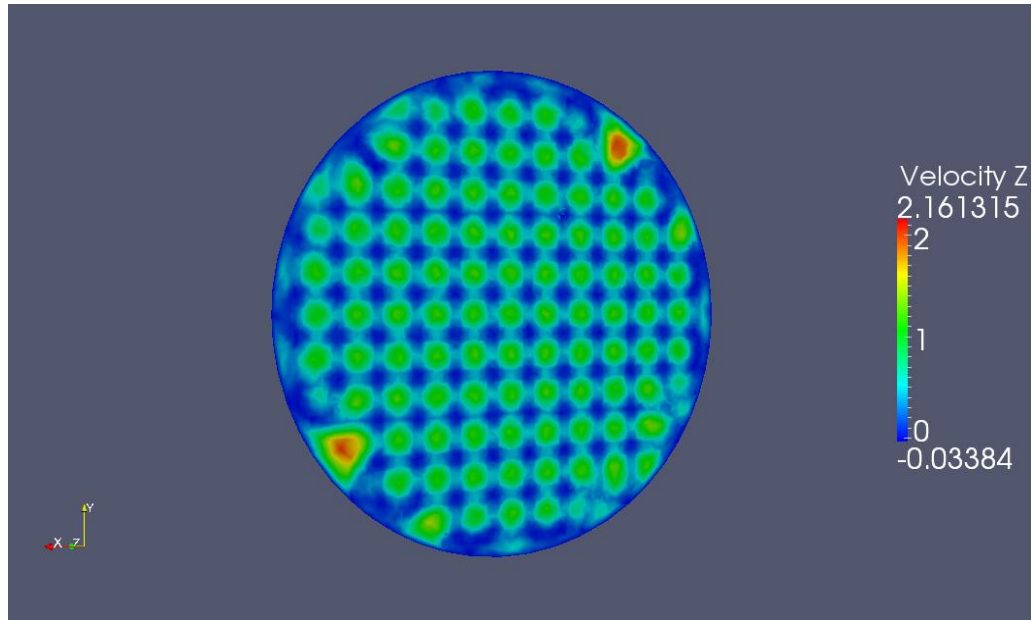


Figura 15. Representación de las velocidades en el plano $Z=0$ calculadas con FEMPAR.

En la Figura 15, se vuelve a representar el plano en $Z=0$. Como se aprecia en la imagen la distribución de las velocidades es la misma que la obtenida con COMSOL. Podemos observar claramente que los valores máximos se concentran en las mismas zonas en la que se crea más espacio.

En los huecos que provocan la posición de las dos capas, los valores son próximos a 1 mm/s y el valor máximo de velocidad es 2.16 mm/s. Comparando estos valores con los de COMSOL, vemos que son perfectamente compatibles ya que en estos huecos los valores también eran cercanos a 1 mm/s mientras que el valor máximo era 2.3 mm/s.

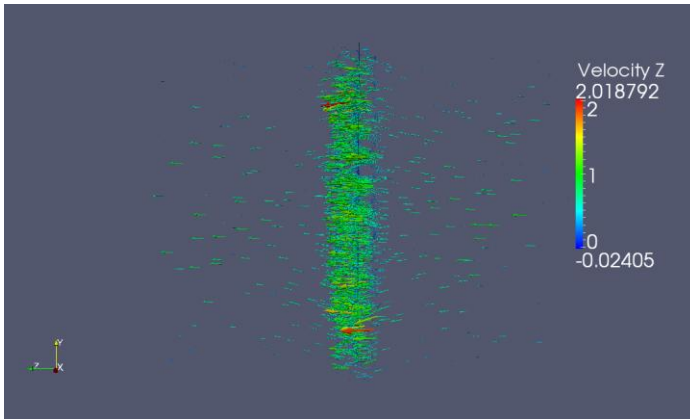


Figura 16. Representación de las líneas de flujo en el plano ZY.

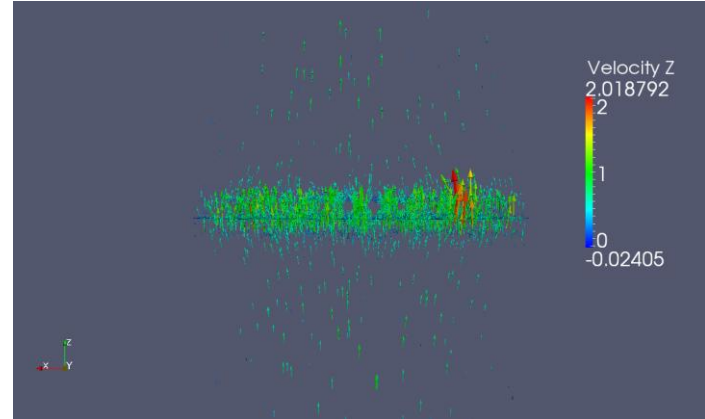


Figura 17. Representación de las líneas de flujo en el plano XZ.

Estas dos Figuras 16 y 17, muestran las líneas de flujo que dibujan la trayectoria que sigue el fluido, representando como anteriormente aquellos lugares en que la velocidad es máxima.

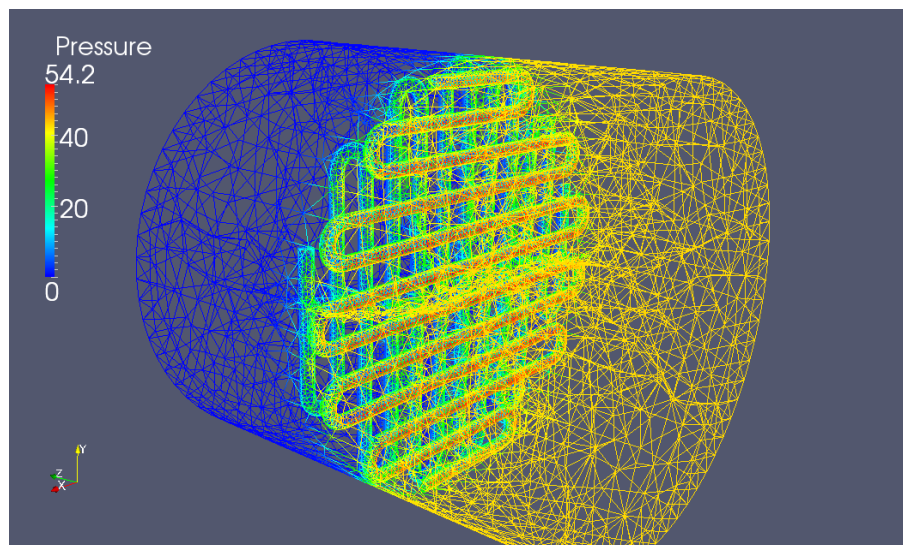


Figura 18. Representación tridimensional de las presiones en todo el dominio calculadas con FEMPAR.

En la figura 18 encontramos representada la presión, que igual que anteriormente a causa de la condición de contorno impuesta será 0 en la salida.

Se vuelve a ver que los valores máximos se encuentran en la parte posterior de la primera capa, con aproximadamente un valor de $50 \text{ mm}^2/\text{s}^2$. Comparando estos valores con los obtenidos con COMSOL, podemos darlos

por válido, ya que los valores encontrados en esta misma capa habían sido entorno a 0.05 Pa, los cuales mediante aplicando los factores de conversión que se han comentado serian $50 \text{ mm}^2/\text{s}^2$.

$$\frac{0.05 \text{ Pa}}{1000 \text{ Kg/m}^3} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2 = 50 \text{ mm}^2/\text{s}^2 \quad (23)$$

A diferencia de COMSOL, con FEMPAR se han calculado las tensiones totales que sufre el scaffold, por lo tanto estos esfuerzos se representaran con signo opuesto, pero tendrán el mismo valor nominal.

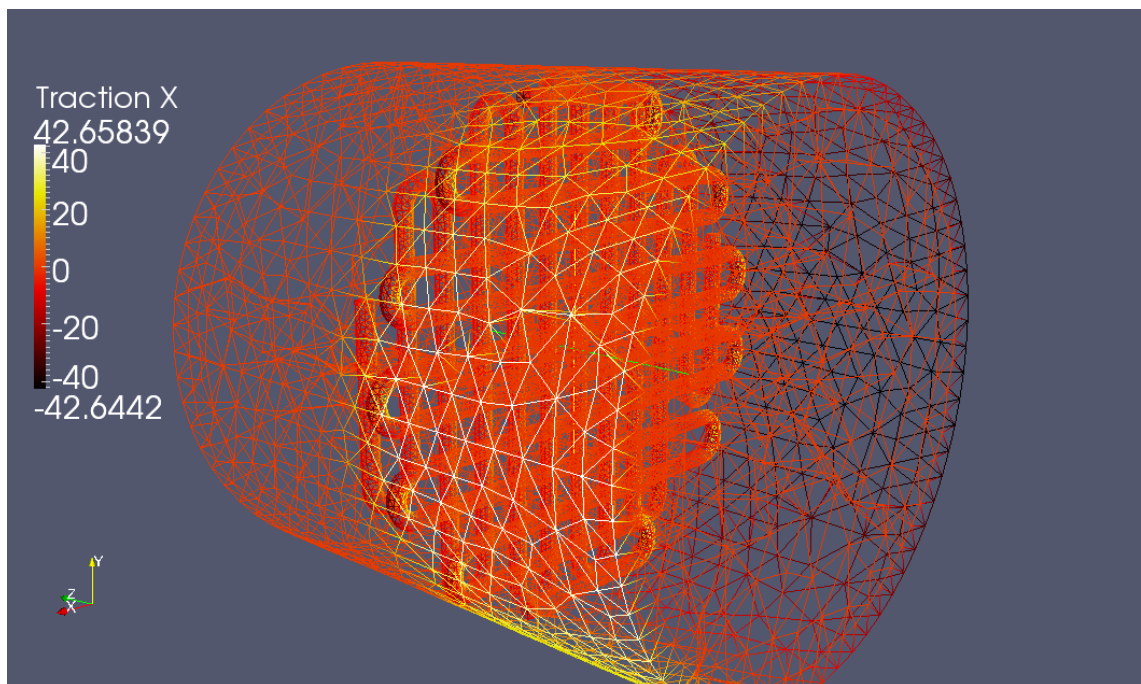


Figura 19. Representación tridimensional de las tensiones totales a lo largo del dominio en la dirección X, calculadas con FEMPAR.

En la Figura 19, al igual que en la Figura 6 , y por la misma razón que anteriormente, se muestra como las tensiones que sufre el scaffold son prácticamente 0.

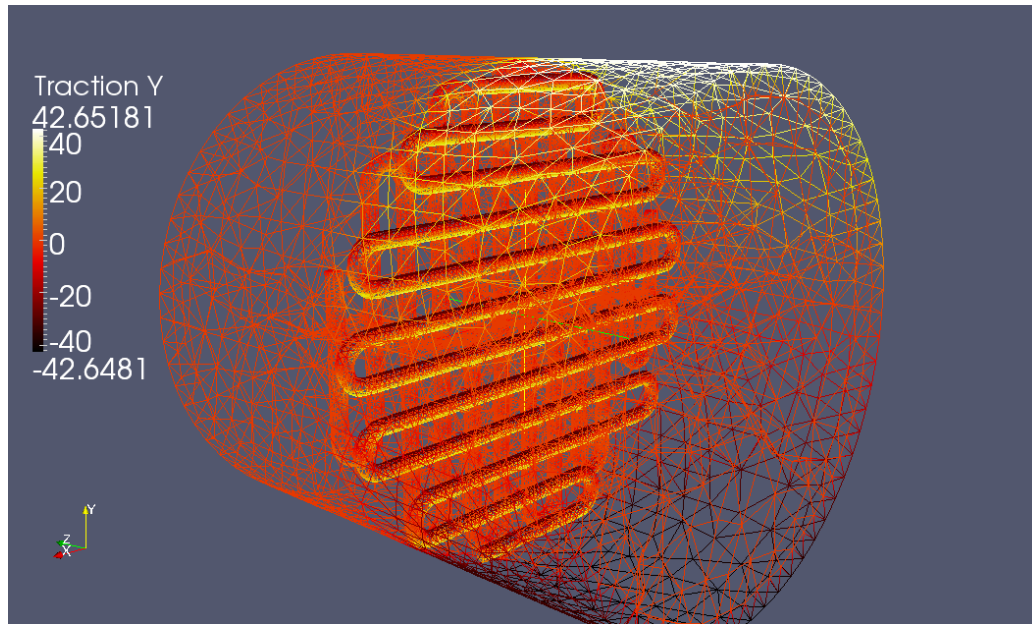


Figura 20. Representación tridimensional de las tensiones totales a lo largo del dominio en la dirección Y, calculadas con FEMPAR.

Mientras tanto, en la Figura 20 , se observa como se vuelven a compensar los valores sobre la primera lámina del scaffold. Esta vez estos valores oscilarán entre $42.65 \text{ mm}^2/\text{s}^2$ y $-40 \text{ mm}^2/\text{s}^2$, o lo que es lo mismo entre 0.042 Pa y -0.4 Pa .

Comparando estos valores a los COMSOL, los cuales oscilaban entre $[0.03, -0.03] \text{ Pa}$, podemos concluir que el cálculo realizado con FEMPAR es equivalente para este parámetro.

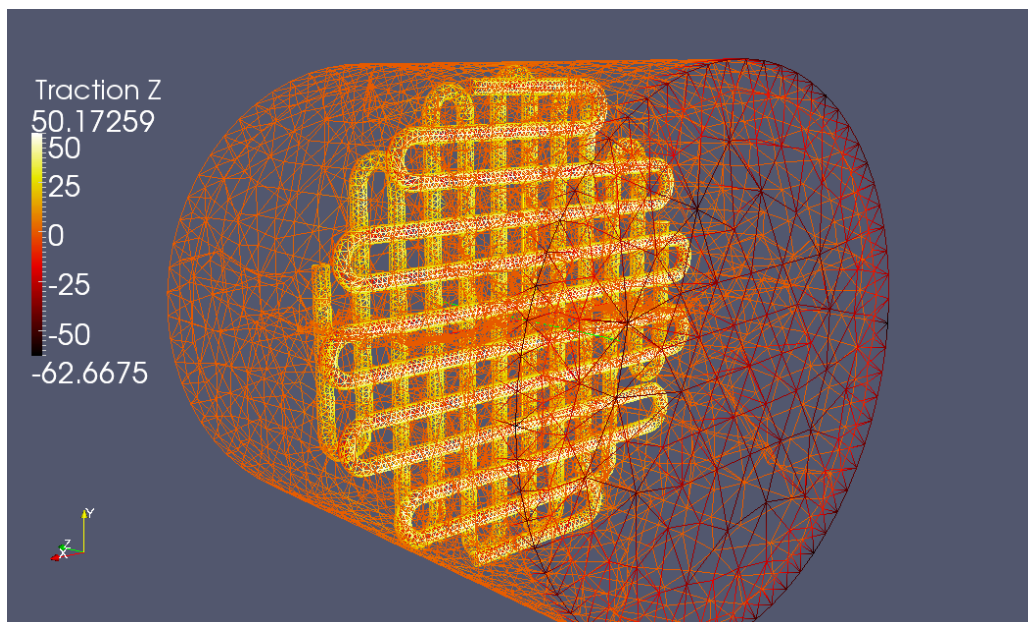


Figura 21. Representación tridimensional de las tensiones totales a lo largo del dominio en la dirección Z, calculadas con FEMPAR.

En la Figura 21, se vuelve a observar una concordancia con los resultados del capítulo anterior. Y es que los esfuerzos que sufre la parte delantera del scaffold que está expuesta al impacto del fluido, concentra unas tensiones alrededor de $50.1 \text{ mm}^2/\text{s}^2$, mientras que con COMSOL los valores observados en este lugar eran aproximadamente de 0.05Pa.

Por lo tanto una vez mostrados todos estos parámetros, podemos concluir que el análisis realizado con FEMPAR muestra resultados similares a los obtenidos en COMSOL.

Por último a continuación en las Figuras 22 y 23, se muestra una comparativa de la tensiones en Z, desde una vista frontal, para hacer más visible esta coincidencia en los resultados obtenidos.

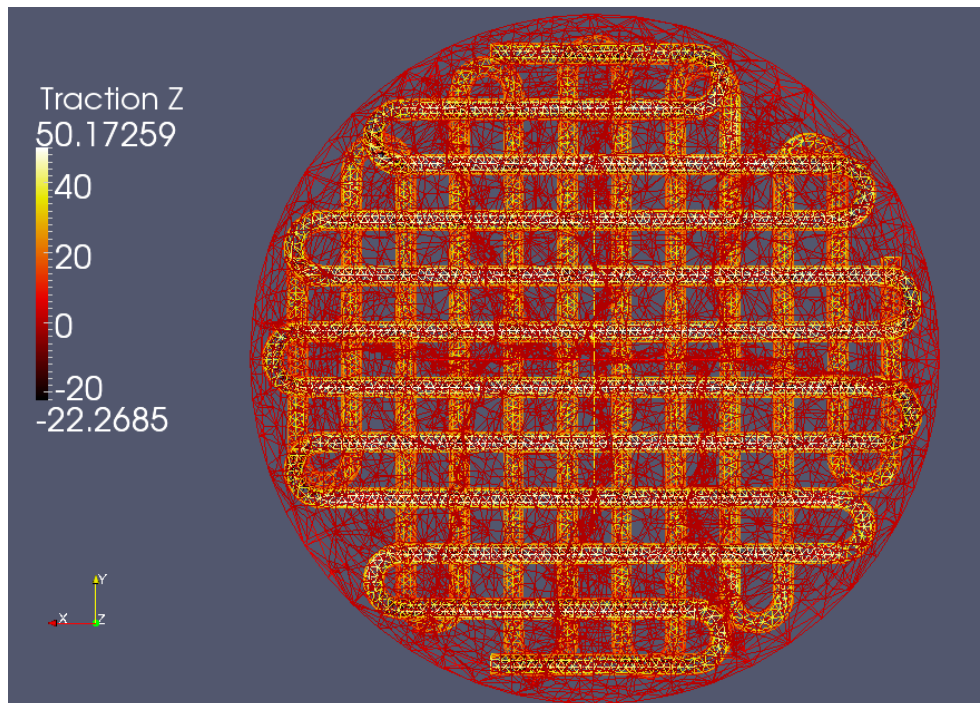


Figura 22. Representación en el plano XY de las tensiones totales a lo largo del dominio en la dirección Z, calculadas con FEMPAR.

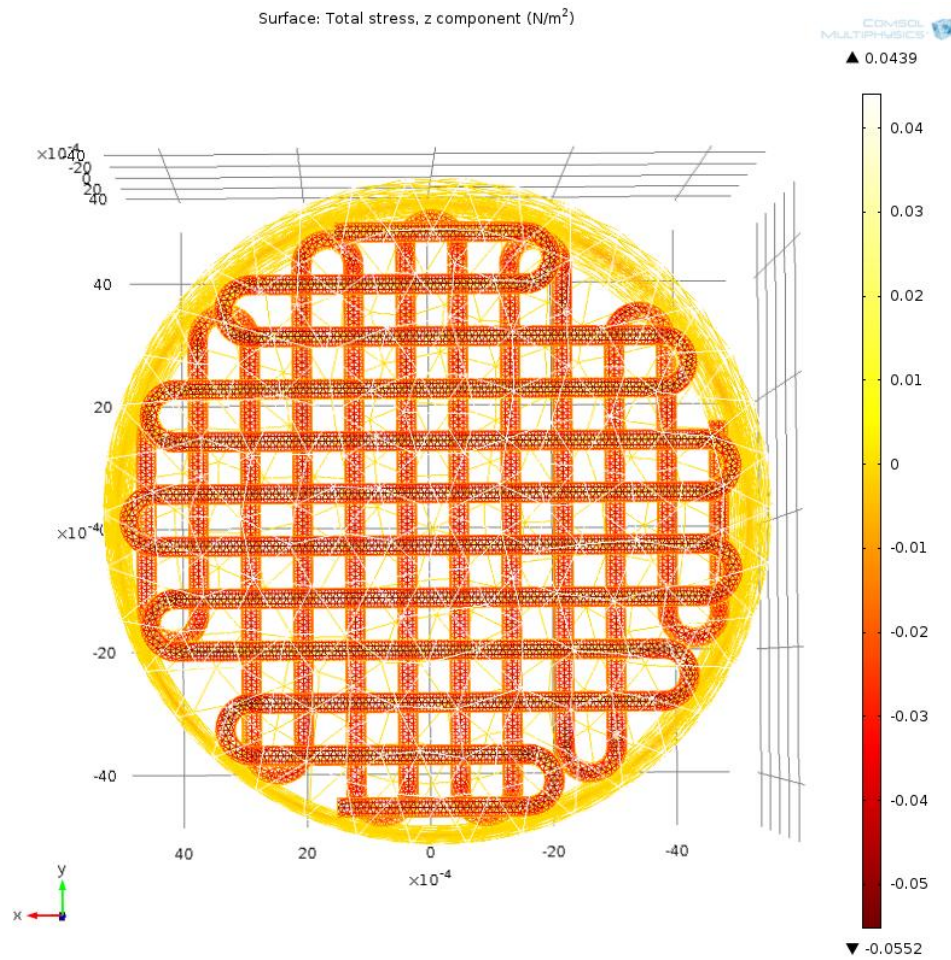


Figura 23. Representación en el plano XY de las tensiones totales a lo largo del dominio en la dirección Z, calculadas con FEMPAR.

3.4 Influencia de la malla

Una vez analizado el caso con COMSOL se ha querido volver a mallar el dominio con una malla un poco más fina, para ver la convergencia de los resultados obtenidos.

Esta vez se ha asignado un tamaño de 0.4 para los elemento, obteniendo una malla con un total de 269726 unidos por 53390 nodos. El error cordal utilizado ha sido de 0.1.

En las siguientes imágenes se comparan los resultados obtenidos con ella malla con los obtenidos en el apartado anterior en el que se había construido una malla de 185744 elementos.

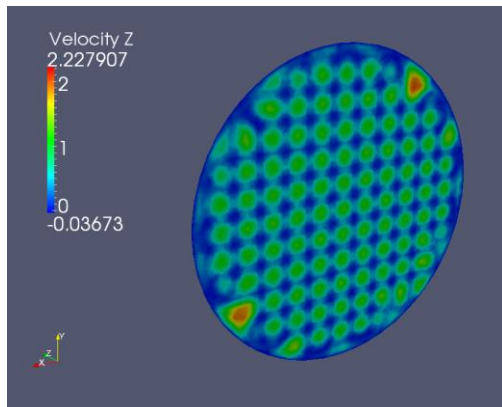


Figura 24. Representación de las velocidades en el plano $Z=0$ para una malla con 269726 elementos

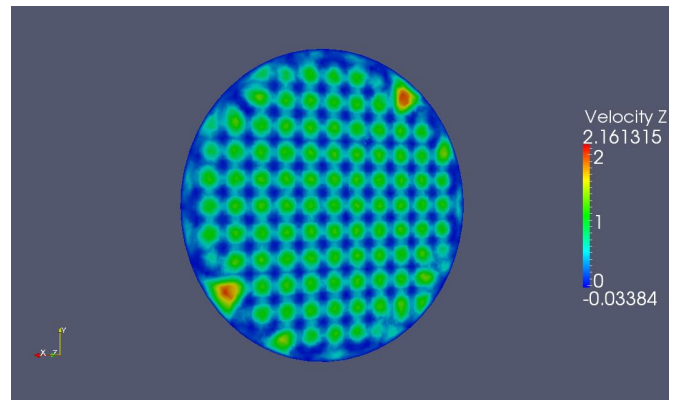


Figura 25. Representación de las velocidades en el plano $Z=0$ para una malla con 185744 elementos.

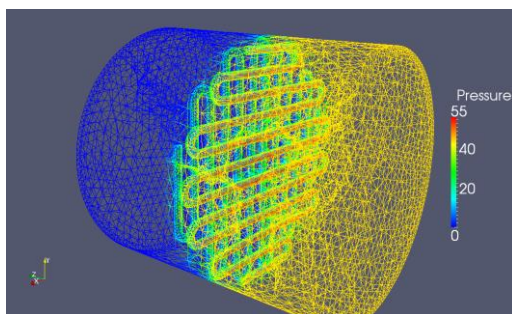


Figura 26. Representación tridimensional de la presión en todo el dominio con una malla de 269726 elementos.

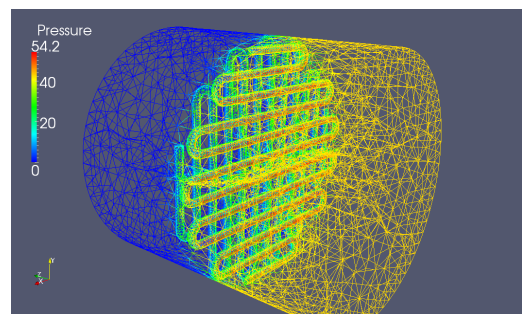


Figura 27. Representación tridimensional de la presión en todo el dominio con una malla de 185744 elementos.

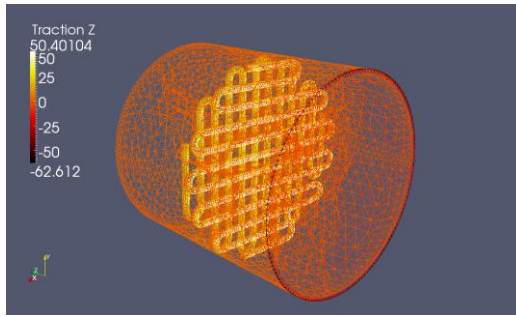


Figura 28. Representación tridimensional de las tensiones totales a lo largo del dominio en la dirección Z para una malla de 269726 elementos.

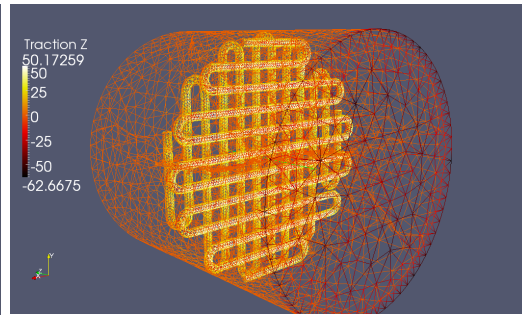


Figura 29. Representación tridimensional de las tensiones totales a lo largo del dominio en la dirección Z para una malla de 185744 elementos.

Como se puede observar en las Figuras 24,25,26,27,28 y 29, los valores de velocidad, presión y tensiones en el eje Z que se muestran respectivamente en este apartado, no varían prácticamente con los encontrados con la otra malla un poco más gruesa. Por lo tanto esto sugiere que la malla puede llegar a converger, y que en este caso su influencia respecto a los resultados obtenidos es nula.

CAPÍTULO 4:

EFFECTO DE

RUGOSIDADES EN EL

SCAFFOLD

Los scaffolds diseñados con 3D printing, no son perfectamente lisos como el que se ha analizado en los capítulos anteriores, sino que pueden tener una serie de imperfecciones causadas por la impresión. Estas imperfecciones pueden ser muy importantes a la hora de estudiar los esfuerzos viscosos que puede soportar el scaffold a causa del impacto del fluido. Muchos de los fabricantes lo dan la importancia necesaria a la aparición de estas rugosidades en cualquiera de los filamentos que lo componen, pero la verdad es que es un factor muy importante a tener en cuenta tal y como se mostrará en este cuarto capítulo.

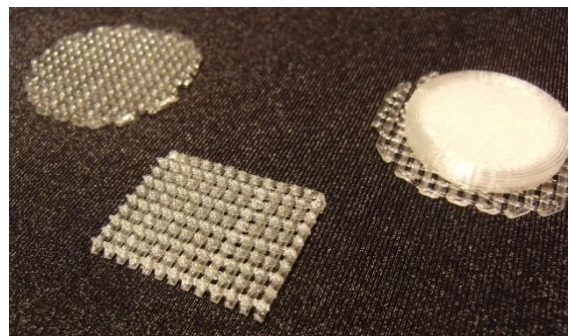


Figura 30. Imagen real de scaffolds de forma circular y cuadrática.

4.1. Influencia de las rugosidades y del mallado.

Además de las variaciones que pueden provocar las imperfecciones, cuando se realiza un estudio de CFD es importante saber cuál es el tipo de malla que se debe usar, ya que los resultados pueden variar en función del número de elementos y dimensión de estos.

Por eso se han diseñado cuatro geometrías distintas que constan de dos hilos, uno rugoso y otro liso. Las cuatro tipos de rugosidades están detallados en el Anexo A.

El análisis de este apartado se realizará con COMSOL, dónde se seguirán los mismos pasos que en el capítulo dos, variando únicamente la velocidad de entrada del fluido, la cual le asignaremos $u_{media} = 0.001 \text{ m/s}$.

Además, se han generado cuatro tipos de mallas distintas para cada una de las cuatro geometrías. Todas estas mallas se formarán a partir de elementos tetraédricos.

Las especificaciones de los cuatro tipos de malla utilizadas son las siguientes:

Tabla 2. Características de los diferentes tipos de malla utilizados con COMSOL.

	TIPOS DE MALLA			
	COARSE	NORMAL	FINE	FINER
Max. Element size	0.00122	$8.11 \cdot 10^{-4}$	$6.49 \cdot 10^{-4}$	$4.46 \cdot 10^{-4}$
Min. Element size	$2.27 \cdot 10^{-4}$	$1.46 \cdot 10^{-4}$	$8.11 \cdot 10^{-5}$	$3.24 \cdot 10^{-5}$
Max. Element growth rate	1.6	1.5	1.45	1.4

Una vez se han generado todas las mallas, se han obtenido el siguiente número de elemento para cada tipo de rugosidad recogidos en la TABLA 3.

Tabla 3. Número de elementos obtenidos para cada tipo de malla en cada una de las cuatro geometrías.

Tipo de Rugosidad	NUMERO DE ELEMENTOS GENERADOS			
	COARSE	NORMAL	FINE	FINER
1	11584	32083	90617	355029
2	11510	32322	90854	393211
3	10969	30939	86772	334035
4	12243	32129	88136	351292

En la Figura 31 y en la Figura 32, podemos apreciar esta variación de los valores de los esfuerzos viscosos de un mismo hilo dependiendo del tipo de malla que se ha utilizado.

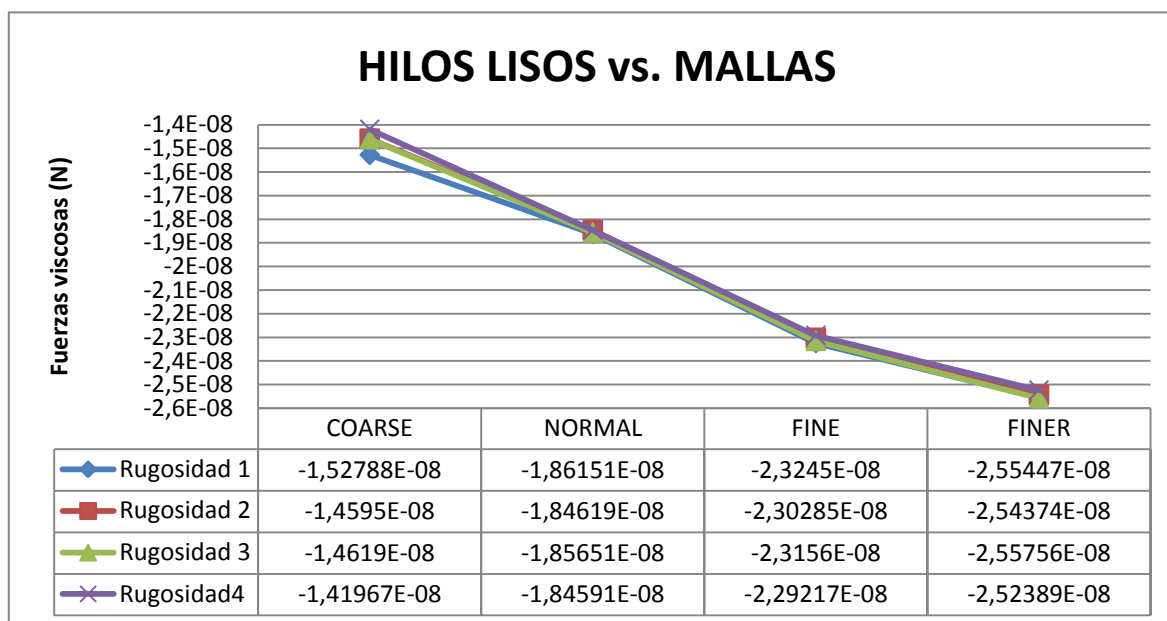


Figura 31. Fuerzas viscosas que sufren las superficies de los hilos lisos en función del tipo de malla.

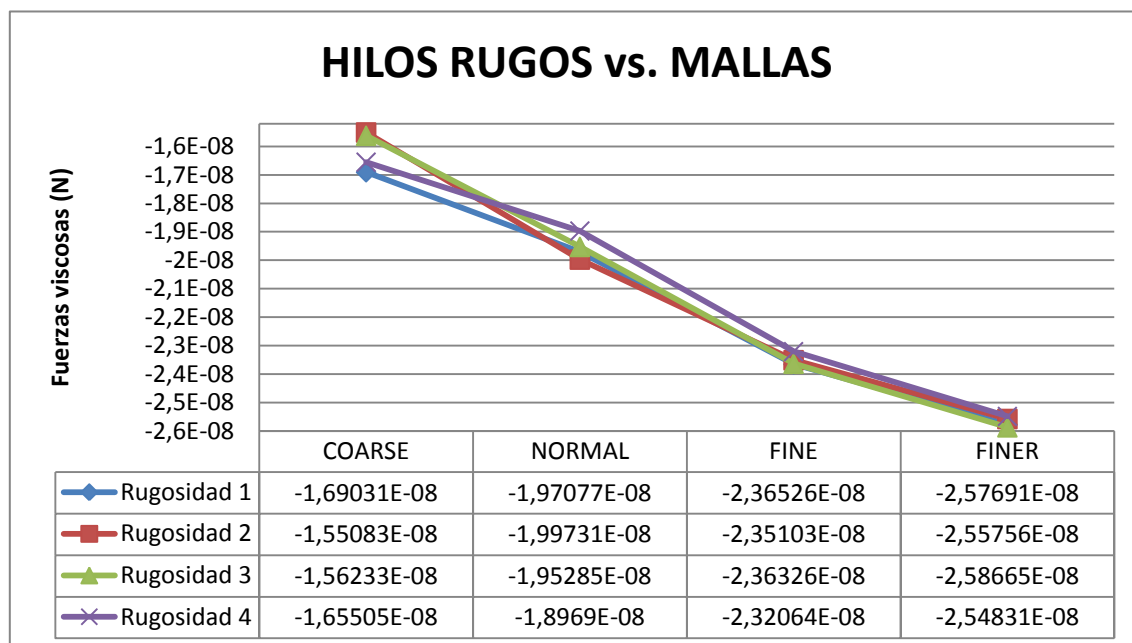


Figura 32. Fuerzas viscosas que sufren las superficies de los hilos rugosos en función del tipo de malla.

Observando los gráficos anteriores de las Figuras 31 y 32, no se puede sacar ninguna conclusión clara respecto a los resultados. Lo único que sugieren estas gráficas es que a medida que se refina la malla los valores de las fuerzas viscosas disminuyen. Si se continúa refinando este valor se estabilizara cuando se alcance la convergencia en malla. Dadas las condiciones en las que se realizó este análisis, se cree que el mallado necesario para este caso está fuera del abasto de este trabajo.

Si fusionamos estos dos gráficos en uno mismo podemos demostrar que los esfuerzos viscosos que sufren las superficies imperfectas son mayores a los que sufren los hilos lisos.

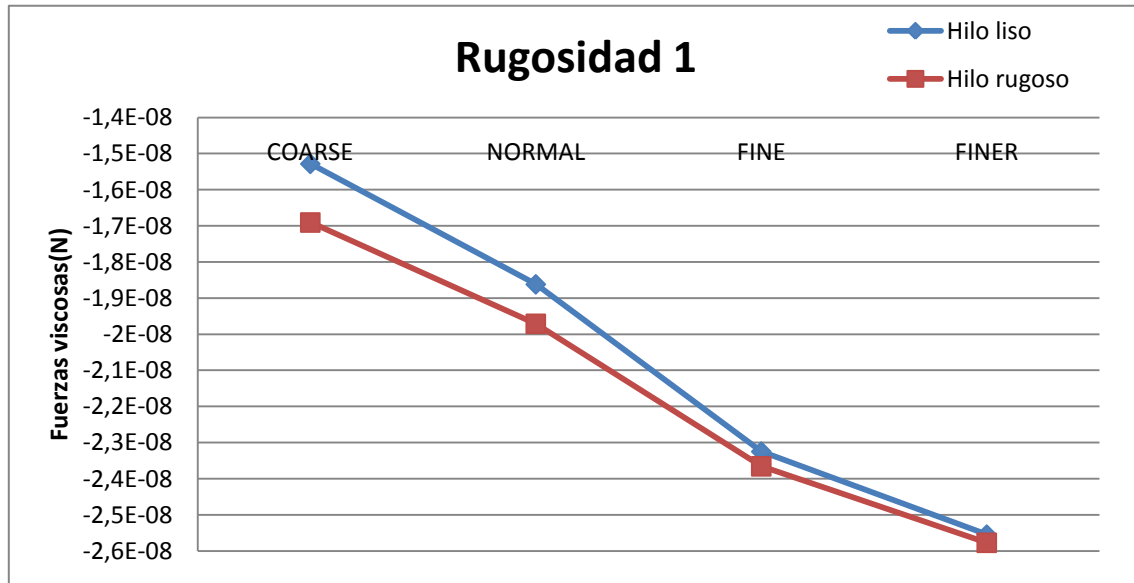


Figura 33. Fuerzas viscosas que sufren las superficies en el hilo liso y rugoso de tipo 1 en función del tipo de malla.

En la Figura 33, se representa únicamente la geometría con rugosidad de tipo 1, puesto que las gráficas para el resto de geométricas muestran prácticamente lo mismo. Igual que en las dos gráficas anterior, analizando este gráfico no se puede afirmar nada con certeza, solo que el mallado que se ha realizado para estos casos ha sido insuficiente. Estas dificultades en el mallado vienen causadas por las funciones sinusoidales con las que se ha diseñado la superficie rugosa.

4.2. Comparación de casos con rugosidades entre COMSOL y FEMPAR.

Después de haber demostrado en el capítulo 2, la validez de los resultados con independencia del programa para un caso muy concreto, se quiere reforzar esa validez y para ello se ha decidido comparar algunos casos con rugosidades, de manera que a la vez se siga demostrando la importancia de la aparición de estas en los hilos del scaffold.

4.2.1. Estudio del caso de los dos hilos

Para este apartado se han utilizado las mismas geometrías que en el apartado 4.1. Todas las consideraciones y condiciones que se aplicarán tanto con COMSOL como con FEMPAR serán las mismas que se han implementado en el caso del "Scaffold General" visto en los capítulos 2 y 3.

La única modificación que se ha hecho es que el radio del cilindro se ha visto reducido a 4.8 mm, por lo tanto en el código de FEMPAR se ha tenido que cambiar esta variable, mientras que en COMSOL, no se ha necesitado ninguna modificación.

El número de elementos que contienen las mallas de cada uno de los dominios para los dos programas viene recogido en la Tabla 4.

Tabla 4. Comparativa del número de elementos obtenidos con COMSOL y FEMPAR para cada tipo de malla en cada una de las cuatro geometrías.

	FEMPAR	COMSOL
Rug. Tipo 1	321965	355029
Rug. Tipo 2	298321	395375
Rug. Tipo 3	357790	334035
Rug. Tipo 4	315825	348644

A diferencia del anterior apartado, en lugar de estudiar únicamente la componente de los esfuerzos viscosos en este caso se han analizado las tensiones totales.

En las siguientes imágenes se muestran estas diferencias de tensiones en la dirección del fluido, para cada tipo de rugosidad:

a) Rugosidad tipo 1

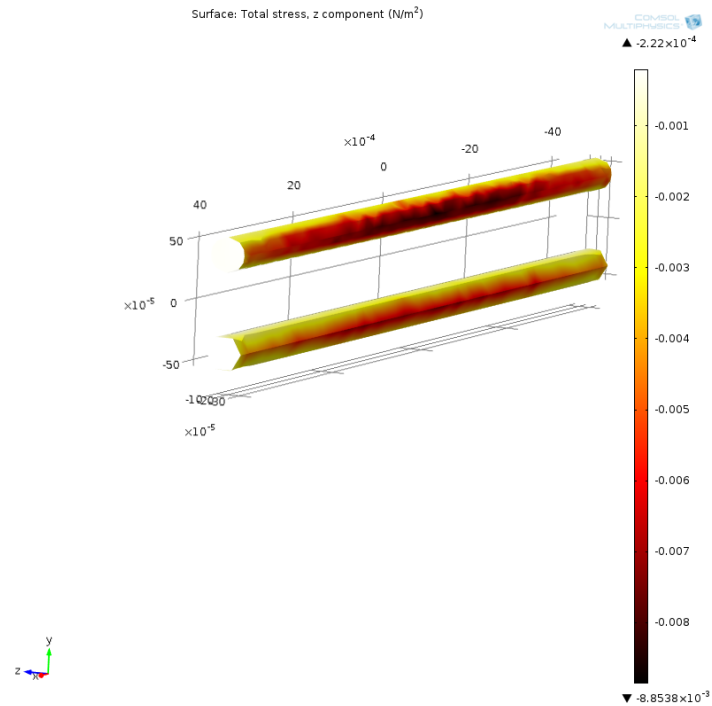


Figura 34. Representación tridimensional de los esfuerzos viscosos en la dirección del fluido en el hilo fino y rugoso de tipo 1, calculados con COMSOL.

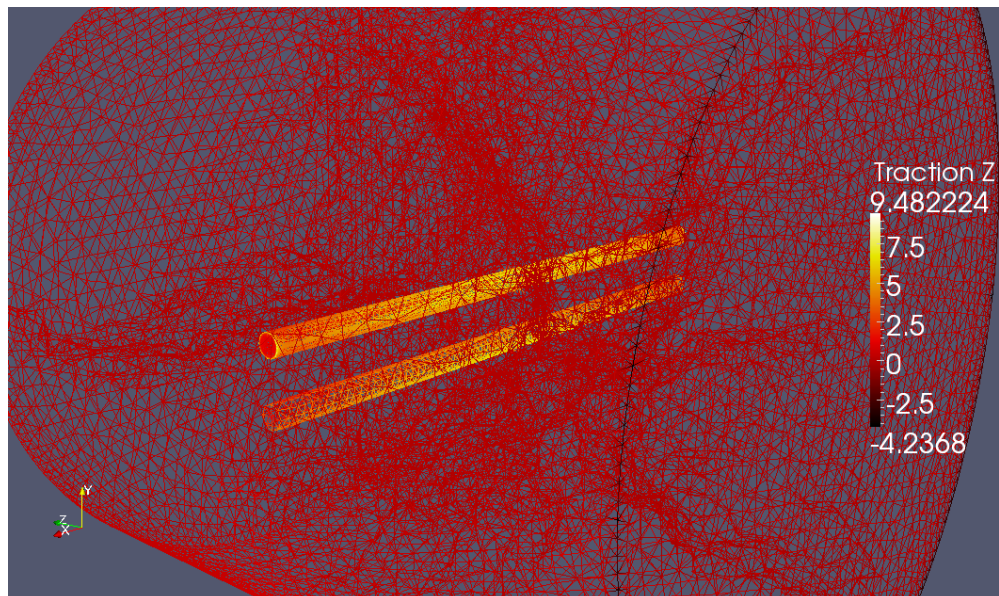


Figura 35. Representación tridimensional de los esfuerzos viscosos en la dirección del fluido en el hilo fino y rugoso de tipo 1, calculados con FEMPAR.

Observando ambas figuras (34 y 35) y teniendo en cuenta, la diferencia de signos y de unidades entre COMSOL Y FEMPAR que se han comentado antes, vemos que en ambos casos se produce mayor esfuerzo en el hilo superior, que es el que está afectado por una serie de imperfecciones. Los valores de esfuerzos y su distribución son aproximadamente iguales en ambos casos.

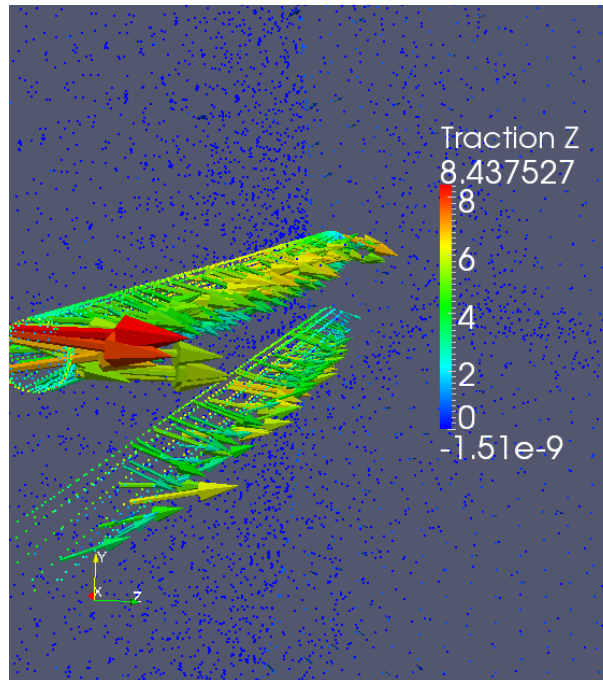


Figura 36. Representación vectorial de los esfuerzos viscosos en la dirección del fluido en el hilo fino y rugoso de tipo 1, calculados con FEMPAR.

En esta Figura 36, se muestran las tensiones que sufren ambos hilos representados como vectores. Con esta imagen se verifica que los valores en el hilo rugoso son mayores que en el liso

b) Rugosidad tipo 2

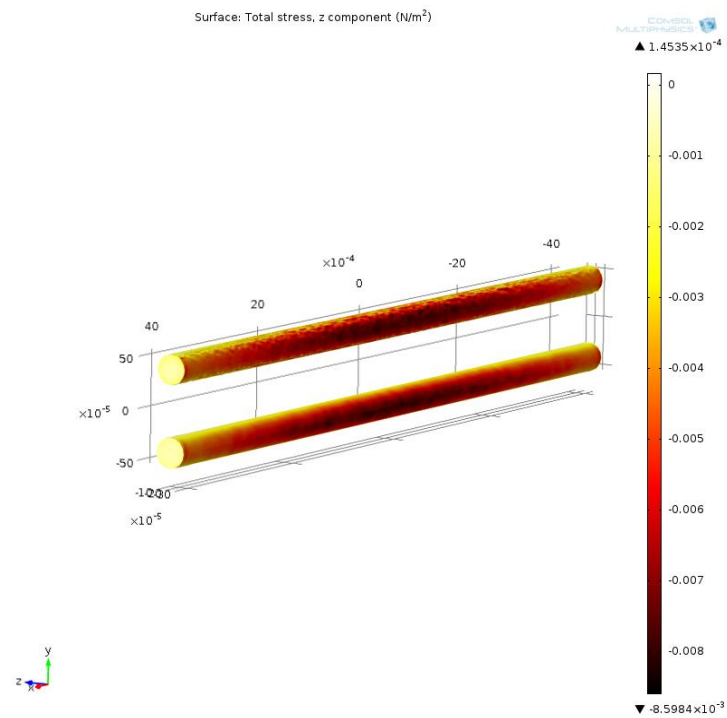


Figura 37. Representación tridimensional de los esfuerzos viscosos en la dirección del fluido en el hilo fino y rugoso de tipo 2, calculados con COMSOL.

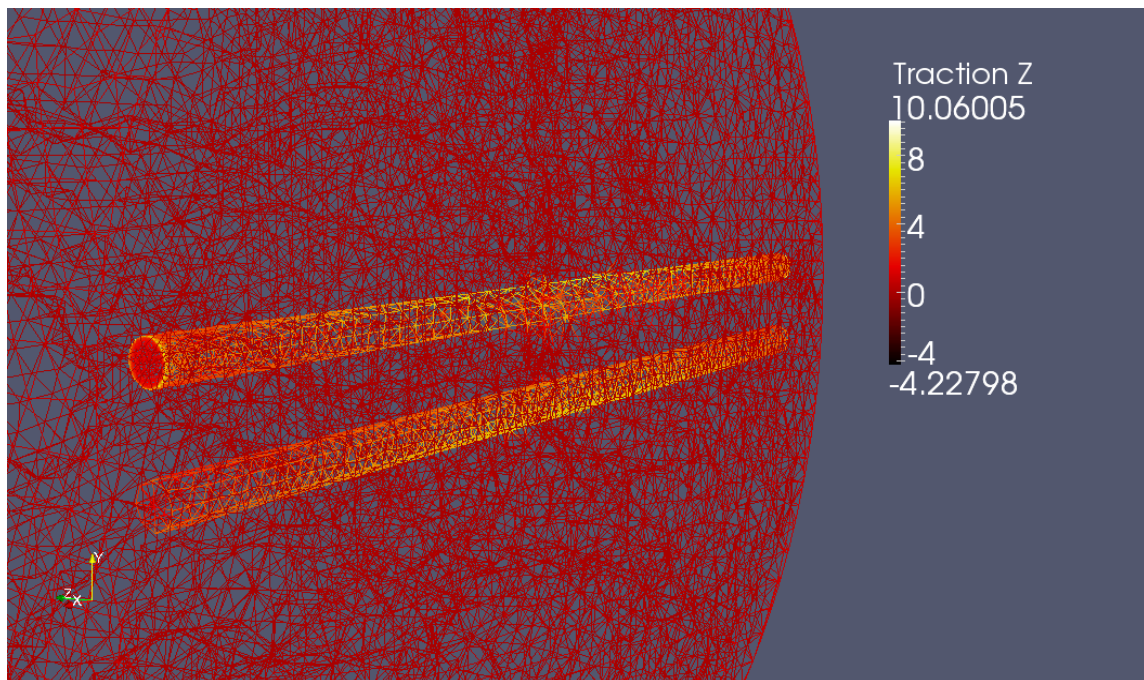
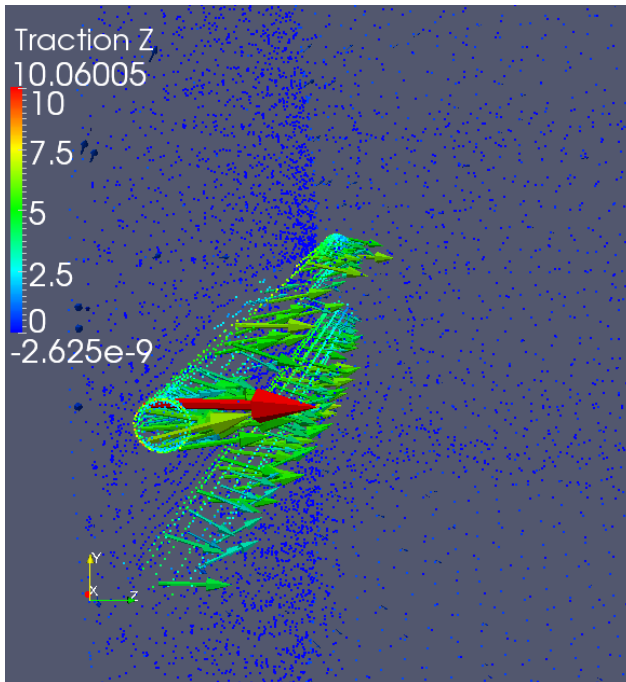


Figura 38. Representación tridimensional de los esfuerzos viscosos en la dirección del fluido en el hilo fino y rugoso de tipo 2, calculados con FEMPAR.

Al igual que en el caso anterior, se observa en las Figuras 37 y 38 como en el hilo rugoso la distribución de las tensiones no es del todo uniforme, y que tiene un valor aproximado de 0.006 Pa.



En la Figura 39, se vuelve a manifestar que el hilo rugoso están contenidos los valores máximos de las tensiones.

Figura 39. Representación vectorial de los esfuerzos viscosos en la dirección del fluido en el hilo fino y rugoso de tipo 2, calculados con FEMPAR.

c) Rugosidad tipo 3

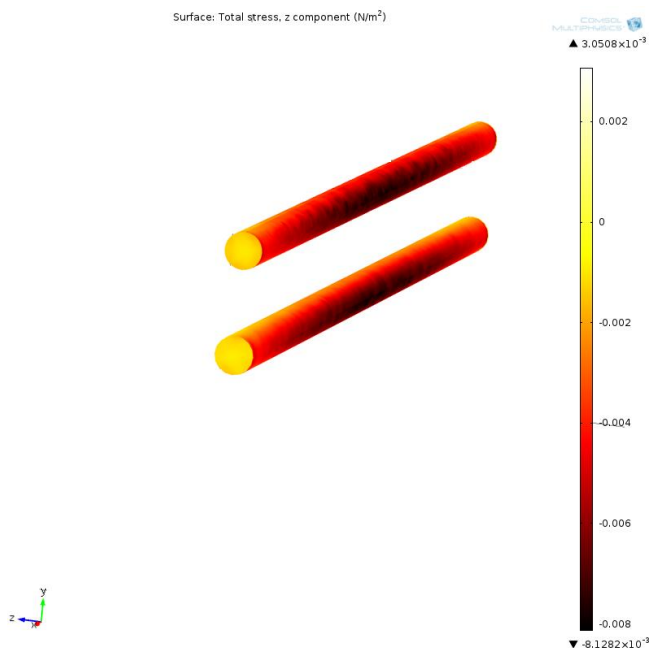


Figura 40. Representación tridimensional de los esfuerzos viscosos en la dirección del fluido en el hilo fino y rugoso de tipo 3, calculados con COMSOL.

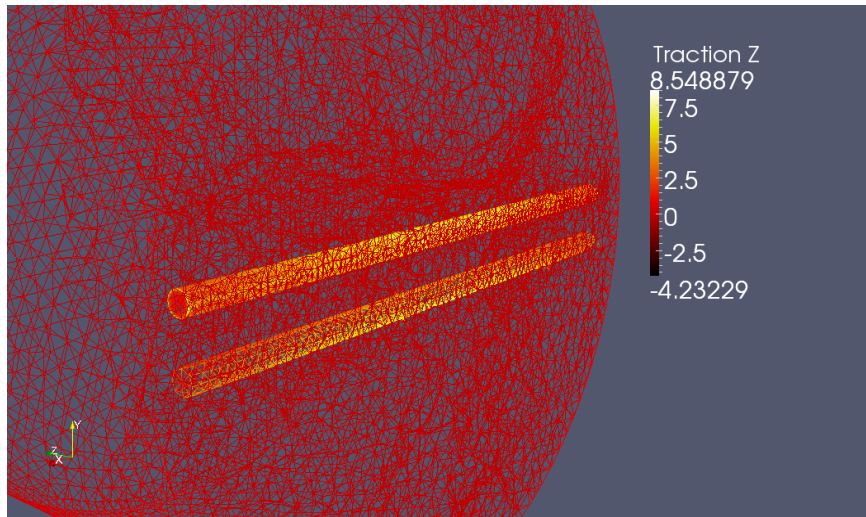


Figura 41. Representación tridimensional de los esfuerzos viscosos en la dirección del fluido en el hilo fino y rugoso de tipo 3, calculados con FEMPAR.

En este caso en el que se representa el hilo con rugosidad de tipo 3, se vuelve a demostrar en las Figuras 40 y 41, la validez de cálculo de tensiones, ya que como se observa en ambas figuras los valores que se distribuyen en hilo rugoso oscilan alrededor de 0.008 Pa.

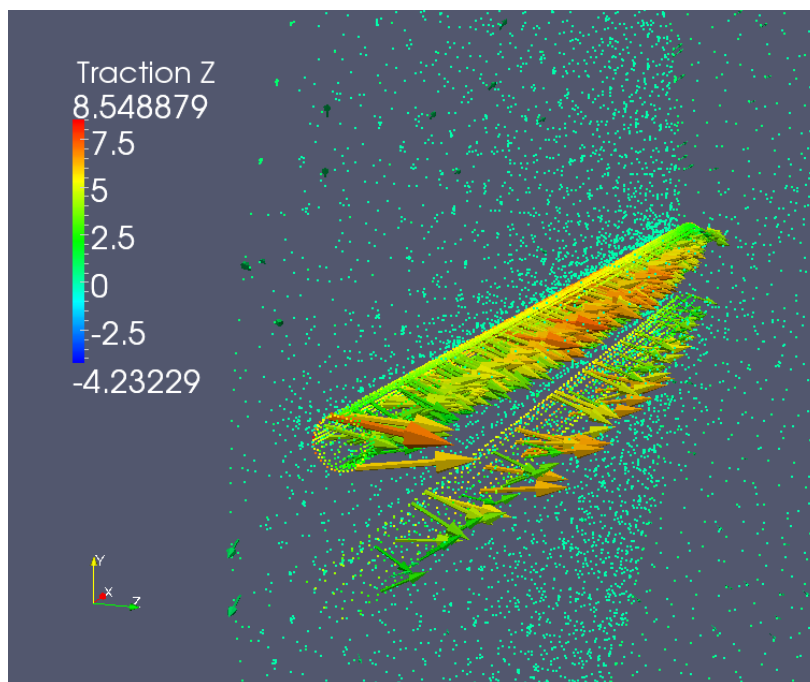


Figura 42. Representación vectorial de los esfuerzos viscosos en la dirección del fluido en el hilo fino y rugoso de tipo 3, calculados con FEMPAR.

En la figura 42, se vuelven a representar los esfuerzos en forma de vector, en los que se ve que son de menor magnitud en el hilo liso.

d) Rugosidad tipo 4

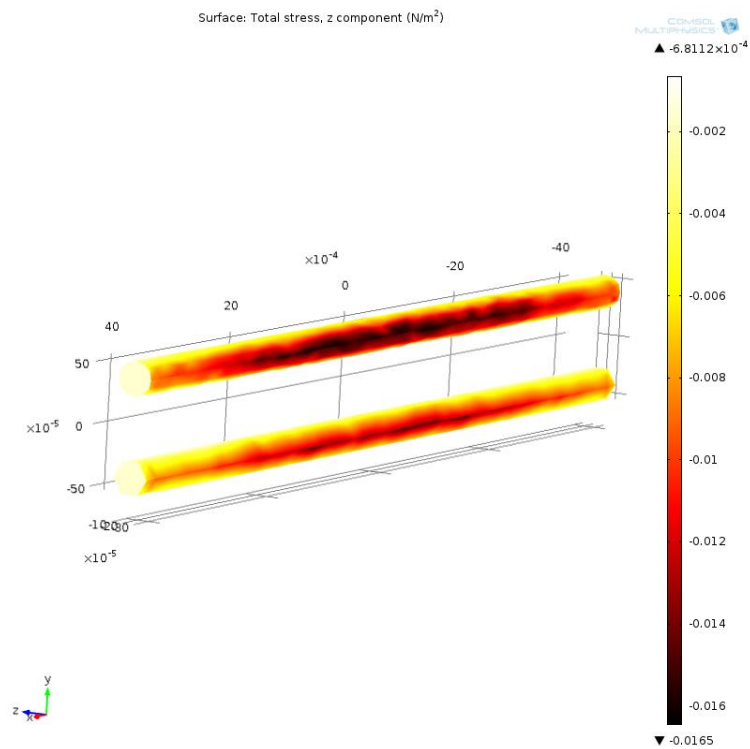


Figura 43. Representación tridimensional de los esfuerzos viscosos en la dirección del fluido en el hilo fino y rugoso de tipo 4, calculados con COMSOL.

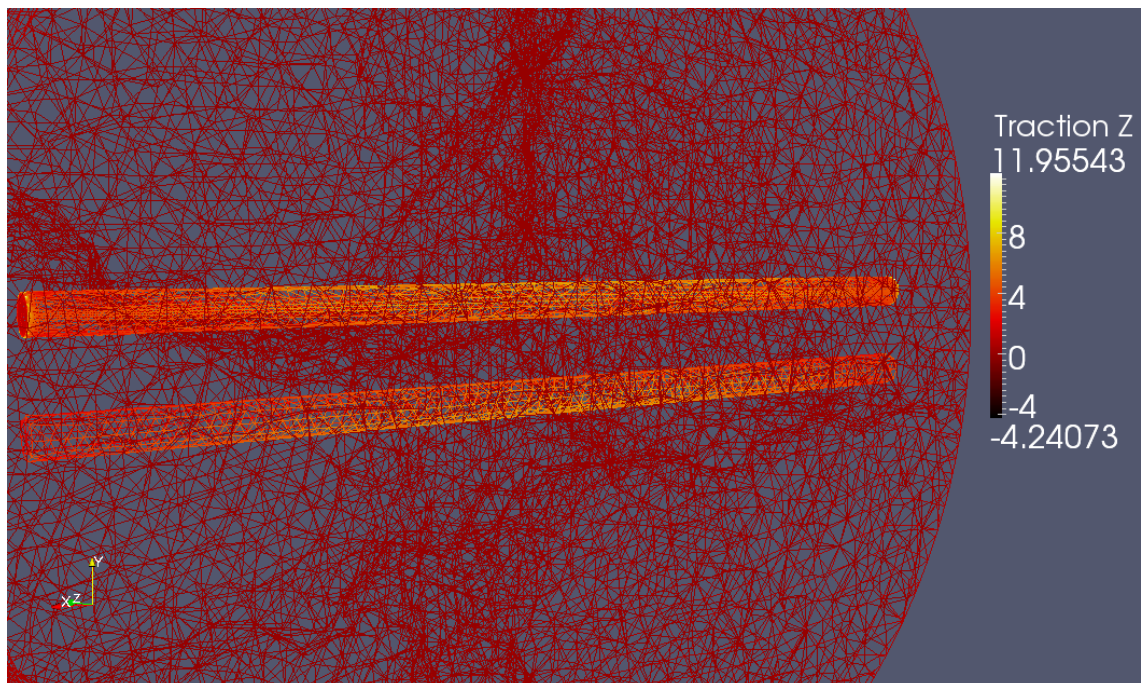


Figura 44. Representación tridimensional de los esfuerzos viscosos en la dirección del fluido en el hilo fino y rugoso de tipo 4, calculados con FEMPAR.

En las Figuras 43 y 44, se observa que en este caso los valores entre COMSOL y FEMPAR, no serán tan exactos como en caso anterior mientras que en COMSOL los valores se encuentran alrededor de 0.015 Pa en la parte frontal del hilo rugoso (superior), en los resultados obtenidos con FEMPAR serán próximos a 0.007Pa, excepto en algún punto en que son cercanos a 0.011 Pa.. Esta variación en los resultados, puede venir dada por unas imperfecciones en el mallado, en estas rugosidades, ya que como bien se ha comentado esta malla se ha diseñado de manera no-estructurada.

De todas formas lo que si se puede afirmar es que para este caso de rugosidad de tipo 4, los esfuerzos continúan siendo mayores en el hilo imperfecto que en el liso.

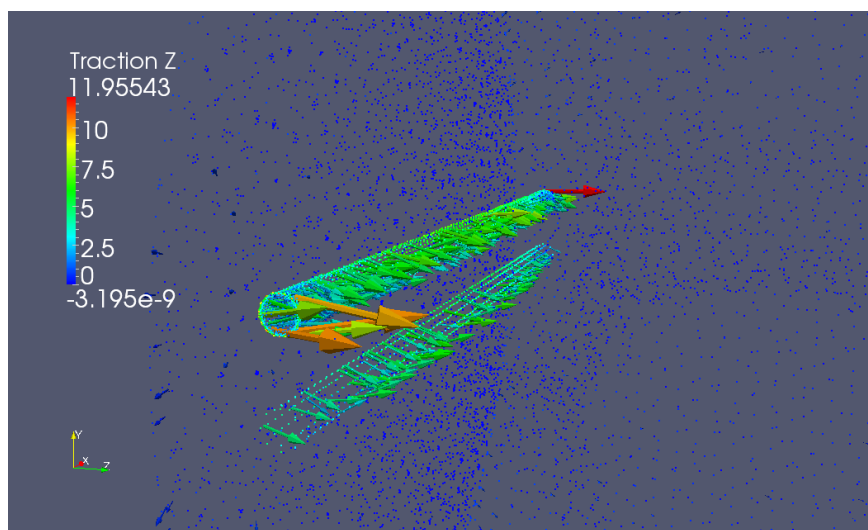


Figura 45. Representación vectorial de los esfuerzos viscosos en la dirección del fluido en el hilo fino y rugoso de tipo 4, calculados con FEMPAR.

En esta figura 45, se aprecian aquellos puntos concretos en los que las tensiones son cercanas a 0.011Pa.

Al igual que en apartado anterior , ya que el tipo de mallado no ha sido el ideal, se podría creer que los puntos de mayor valor de tensión que se visualizan en los cuatro tipos de hilos rugosos de todas las geometrías vienen causados por un mal diseño de la malla, ya que como bien se ha comentado antes dada la complejidad de la geometría es muy difícil que la mallas se adapte a todas las curvaturas que estos hilos poseen.

Sin embargo, en este apartado sí que podemos sacar ciertas conclusiones, ya que aún teniendo en cuenta estos posibles defectos en la malla se cree que la diferencia de valores entre el hilo rugoso y el hilo liso es suficiente para afirmar que la aparición de imperfecciones pueden afectar gravemente a la resistencia de un scaffold.

4.2.2. Estudio de un caso con una lámina completamente rugosa.

En este caso se trata de un scaffold con una única capa, en el cual todos los hilos presentan la misma rugosidad. La lámina que se ha elegido es la más cercana a la entrada del cilindro, o lo que es lo mismo el que recibe primero el impacto del fluido.

El proceso para el análisis ha sido el mismo que anteriormente, y cada malla contará de los siguientes elementos.

Tabla 5. Comparativa del número de elementos obtenidos con COMSOL y FEMPAR para el caso de la capa con rugosidad.

FEMPAR	COMSOL
377767	285890

La única diferencia destacable, es que se ha utilizado un método directo en lugar de iterativo a la hora de encontrar los resultados con COMSOL.

A continuación, en la Figura 46 estos resultados, en los que se observa la distribución a lo largo de todos los hilos de la lámina. Al igual que en los casos del anterior apartado se observa una ligera diferencia de tonalidades en estos hilos, donde se ven distintos valores de tensiones están entre 0.025 y 0.035 Pa. Esto contrasta con la Figura 24, en la que la distribución es más uniforme.

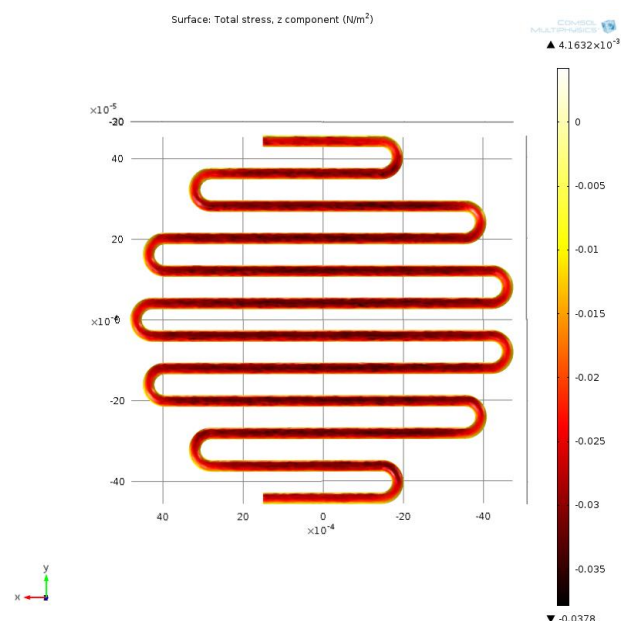


Figura 46. Representación en el plano XY de las tensiones totales en la capa rugosa, calculadas con COMSOL.

Por otro lado los valores encontrados con FEMPAR para este serán los siguientes.

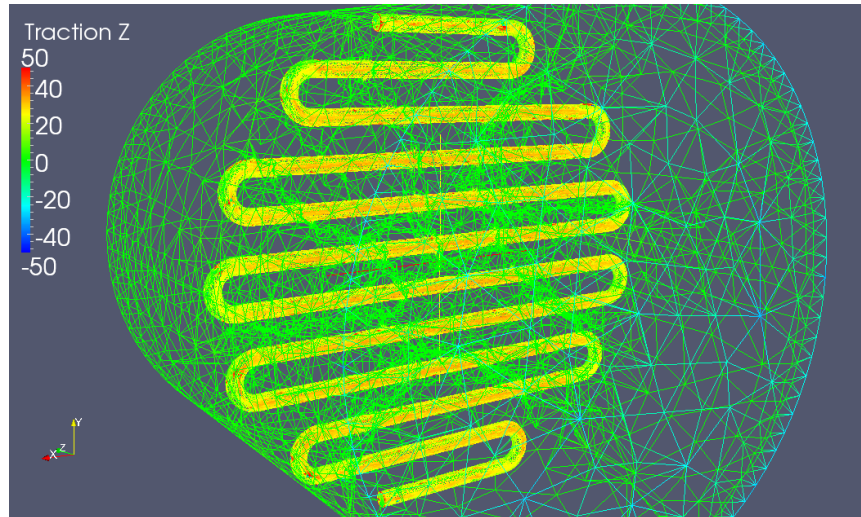


Figura 47. Representación tridimensional de las tensiones totales en la capa rugosa, calculadas con FEMPAR.

Como se muestra en la anterior Figura 47, los valores obtenidos con FEMPAR no son comparables a los obtenidos con COMSOL para este caso.

Aparecen una serie de puntos en los que los valores de las tensiones se disparan notablemente. Estos puntos se pueden apreciar en la siguiente Figura 48, donde varios de ellos se encuentran en las zonas curvas de los hilos.

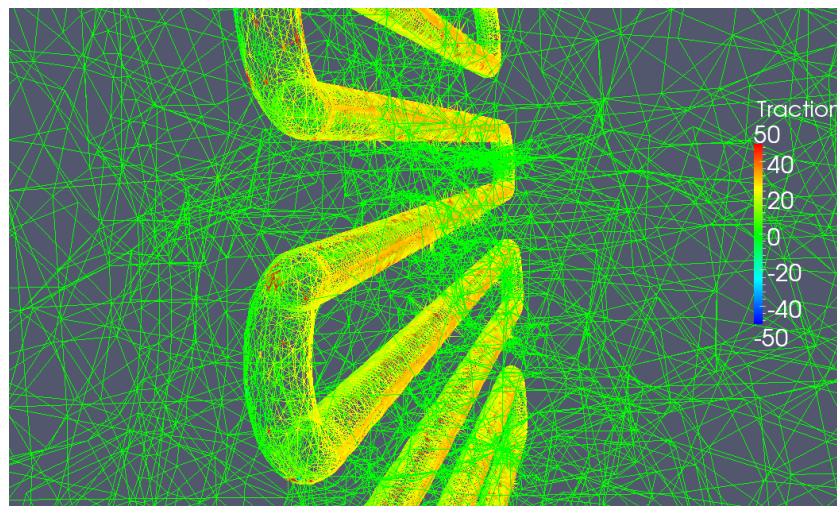


Figura 48. Representación tridimensional ampliada de las tensiones totales donde se aprecian los valores máximos.

Como en el caso de la rugosidad tipo 4, del apartado anterior, todo y que está vez la diferencia es mucho mayor, el problema se encuentra a la hora de realizar el mallado.

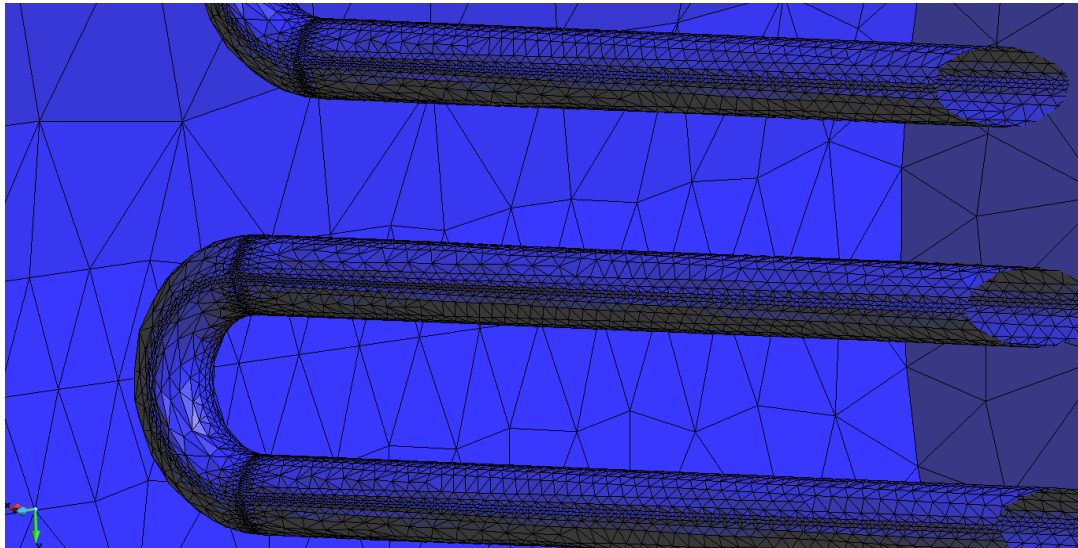


Figura 49. Representación del mallado en las zonas de mayor tensión.

Como bien se observa en la Figura 49, siendo una captura de pantalla realizada con GID, en estas zonas curvas la malla es mucho menos refinada que en los tramos en los que el hilo es horizontal. Esta imagen confirma las suposiciones hechas a lo largo de este capítulo, en las que se ha sugerido que el número de elementos que se debe emplear para resolver estos casos es muy elevado.

Se ha realizado una estimación de cuantos elementos se cree que serían necesarios para que puedan sacar resultados válidos. La estimación se ha realizado de la siguiente forma.

En la Figura 50, se observa una porción de la función sinusoidal que define el perfil de los hilos de la lámina, en la que se muestra la longitud de una de estas ondas.

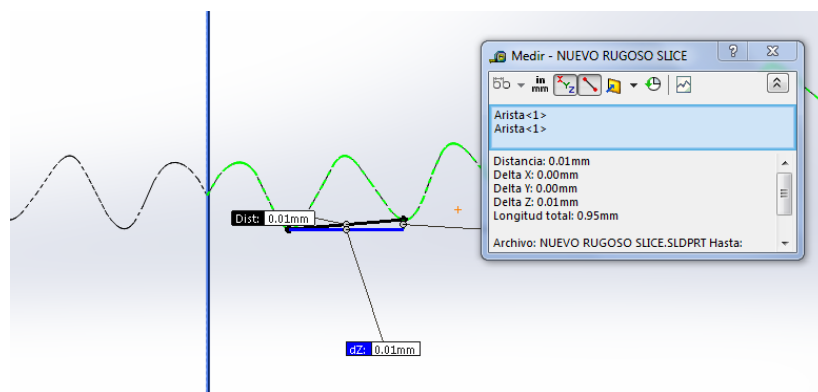


Figura 50. Medición de la Longitud de la onda.

Se ha supuesto que para representar mínimamente esta onda, serían necesarios 8 elementos. Por lo tanto dividiendo esta longitud por el número de elementos, siendo a el tamaño de la arista del elemento tetraedico se ha obtenido el siguiente valor:

$$a \simeq \frac{L}{8} = \frac{0.01}{8} = 0.08 \text{ mm} \quad (24)$$

Una vez sabemos el tamaño que deberán tener estos elementos tetraédricos se ha calculado su volumen a partir de la siguiente fórmula:

$$V_{elemento} = \frac{\sqrt{2}}{12} a^3 = \frac{\sqrt{2}}{12} 0.08^3 = 2.3 \cdot 10^{-10} \text{ mm}^3 \quad (25)$$

A continuación se ha calculado el volumen interior de la lámina, sabiendo que tiene una longitud de 80.21 mm, se ha encontrado que su volumen es:

$$V_{lámina} = r^2 \cdot \pi \cdot L = 0.3^2 \cdot \pi \cdot 80.21 = 22.68 \text{ mm}^3 \quad (26)$$

Finalmente sabiendo el volumen interior de la lámina y de los elementos que la deben cubrir, se ha deducido el número de elementos necesarios:

$$\frac{V_{lámina}}{V_{elemento}} = \frac{22.68}{2.3 \cdot 10^{-10}} = 9.861 \cdot 10^{10} \text{ elementos} \quad (27)$$

Dado que en este caso interesa analizar las zonas cercanas a esta lámina, y teniendo en cuenta que este el número de elementos los necesarios para este volumen interior, sugiere que el número de elementos que se necesitaran en los volúmenes de contorno que se analizaran alrededor de esta capa será mucho mayor que el que el obtenido en la Ec.27. La malla deberá ser más refinada a medida que se aproxime al hilo, mientras que en zonas más alejadas podría ser algo más gruesa, ya que en dichas zonas el estudio del fluido no provoca tanto interés. Por lo tanto, queda demostrado que no podemos validar los resultados anteriores, ya que la malla utilizada no cumple las expectativas necesarias.

CAPÍTULO 5:

CONCLUSIONES

5.1. Valoración de los resultados y los objetivos

Para concluir con este proyecto, se puede decir que a nivel de trabajo se han cumplido los objetivos que previamente se habían establecido.

De forma general, salvo en dos de los seis casos en los que se ha comparado los análisis realizados con COMSOL y FEMPAR, la validación de estos resultados ha sido muy positiva. El principal objetivo de este proyecto era demostrar que ambos programas producen resultados similares y así ha sido. Como se ha comentado a lo largo de esta memoria los valores de velocidad, presión y tracciones que se han encontrado han sido razonables y coherentes tanto en los dos programas como en comparación con trabajos anteriores.

Aunque en algunos de los casos analizados se ha demostrado que la malla utilizada no ha sido la correcta para la obtención de unos buenos resultados. Se considera que el otro objetivo importante del proyecto, que era el demostrar que una pequeña imperfección generada en el scaffold a la hora de su construcción, puede hacer variar considerablemente las distribuciones de las tensiones que puede sufrir el scaffold ha quedado demostrado. Por lo tanto esto sugiere que se trata de un factor a tener muy

en cuenta por los fabricantes de estos scaffolds contruidos con impresoras 3D.

5.2. Problemas y limitaciones

Por otra parte, aunque los resultados hallados hayan sido los esperados, es necesario comentar que debido a la falta de tiempo no se han podido realizar todos los casos que desde un principio se habían planteado, para verificar su validez.

Otra de las dificultades, que ha ralentizado en exceso la elaboración del trabajo, ha sido la importación de las geometrías diseñadas en SolidWorks. Estas geometrías se han debido diseñar varias veces ya que en la mayoría de los casos, a la hora de mallar con GID, el programa detectaba errores en algunos puntos del dominio, los cuales no estaban bien cerrados en estos ficheros IGES. Por esta razón se decidió empezar analizando un caso sencillo, que tratase de un scaffold con dos láminas, y que una vez se consiguiera validar, se profundizaría en otros casos con geometrías más complejas.

Pero sin duda alguna, la mayor dificultad, ha sido la familiarización con el sistema Linux, y el encontrar los errores y complicaciones que se han producido hasta encontrar los resultados correctos. En ocasiones encontrar el origen de estos problemas ha sido muy costoso y duradero.

5.3. Líneas futuras

Finalmente, es necesario comentar que este trabajo es solo el comienzo de una serie de proyectos en los que espero que se pueda llegar a profundizar más a fondo.

Se cree que puede servir como patrón como futuros trabajos, en los que se realicen análisis en CFD con geométricas de scaffolds algo más complejas.

Otro punto interesante para futuros proyectos, sería el de intentar generar una malla como la que se ha estimado en el último capítulo, que tenga los suficientes elementos para abastecer todas las superficies rugosas que se vayan a analizar. Partiendo desde este punto se cree que los resultados que se podrán obtener serán válidos.

En definitiva, se cree los trabajos que puedan venir a continuación de éste tienen una muy buena perspectiva de futuro.

CAPÍTULO 6:

PRESUPUESTO

A continuación se detallará el presupuesto que se ha estimado para la realización de este proyecto:

	Unidades	Coste por unidad (€/u)	Coste por hora (€/h)	Horas (h)	Total (€)
PC HP	1	600,00	-	290	600,00
Licencia COMSOL 4.3a	1	4000	-	30	103,44
Salario base	-	-	18	380	6840
4,7 % Seguridad Social(€)	-	-	0,846	380	321,48
10% I.R.P.F(€)	-	-	1,8	380	684
Subtotal					6537,96
21% IVA					1372,97
TOTAL					7910,93

El presupuesto final del proyecto asciende a la cantidad de SIETE MIL NOVECIENTOS DIEZ CON NOVENTA Y TRES CÉNTIMOS DE EUROS.

CAPÍTULO 7:

BIBLIOGRAFÍA

7.1. Referencias bibliográficas

Voronov R., VanGordon S., Sikavitas V.I. and Papavassiliou D.V, 2010, Computational modeling of flow-induced shear stresses within 3D salt-leached porous scaffolds imaged via micro-CT. Journal of Biomechanics 43: 1279-1286.

Tseng T-L. B., Chilukuri A., Park S.C. and Kwon Y.J.,2014, Automated quality characterization of 3D printed bone scaffolds. Journal of Computational Design and Engineering vol.1, 3:194-201.

Zermatten E., Vetsch J.R., Ruffoni D.,Müller R. and Steinfeld A., 2014, Micro-Computed Tomography Based Computational Fluid Dynamics for the Determination of Shear Stresses in Scaffolds Within a Perfusion Bioreactor. Annals of Biomedical Engineering 42: 1085-1094.

Liu C., Xia Z. and Czernuszka J.T., 2007, Design and development of three-dimensional scaffolds for tissue engineering. Chemical Engineering Research and Design 85:1051-1064.

Lam C.X.F., Mo X.M., Teoh S.H. and Hutmacher D.W., 2002, Scaffold development using 3D printing with a starch-based polymer. *Materials Science Engineering C* 20: 49-56.

Lee M., Dunn J.C.Y. and Wu B.M., 2005, Scaffold fabrication by indirect three-dimensional printing. *Biomaterials* 26: 4281-4289.

7.2. Bibliografía de Consulta

Libros:

Çengel Y.A.; Cimbala J.M.; *Mécanica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones* ; McGraw-Hill, Segunda edición, 2010.

Torm T.; TFG: *Estudi i Disseny d'un Bioreactor amb Scaffolds Construïts amb 3D Printing*; Departamento de Mecánica de Fluidos, EUETIB, Junio de 2013.

Roache P.J.; *Fundamentals of Computational Fluid Dynamics*; Hermosa Publishers, 1998.

Ferziger J.H.; Peric M.; *Computational methods for fluid dynamics*; Springer 2002.

Preciado C.; Moral F.J.; *Normalización del dibujo técnico*; Editorial Donostiarra, 2004

Tutoriales:

Learning the Shell : http://linuxcommand.org/learning_the_shell.php

GID: <http://www.gidhome.com/support/tutorials>

ParaView: *The ParaView Guide (Updated for ParaView version 4.3)*; January 20, 2015

COMSOL: *Introduction to Comsol Multiphysics*; Octubre 2014.

COMSOL Multiphysics Reference Guide; Version: Novembre 2012; COMSOL 4.3^a